



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**KONSTRUKCE 3D TISKÁRNY PRO VELKOROZMĚROVÉ
DÍLY**

MECHANICAL DESIGN OF 3D PRINTERS FOR LARGE-SIZED PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Březina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Josef Březina**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce 3D tiskárny pro velkorozměrové díly

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Díly přesahující rozměry 25 x 25 x 30 cm lze považovat z hlediska 3D tisku za velkorozměrové. Profesionální stroje pracující na principu vytlačování tiskové struny (technologie FDM) dokáží vyrábět díly o rozměrech 900 x 600 x 900 mm avšak v oblasti amatérského 3D tisku (RepRap) podobná zařízení chybí.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Sestavit 3D tiskárnu pro tisk polymerních materiálů o velikosti pracovního prostoru 500 x 500 x 400 mm.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- návrh variant řešení,
- výběr finální konstrukce a vytvoření seznamu dílů,
- realizace výroby,
- ověření funkce na stavbě konkrétního dílu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkres sestavení, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

DRUMM, Brook, et al. Make: 3D printing projects. First edition. San Francisco: Maker Media, 2015, xvii, 263 stran : barevné fotografie. ISBN 978-1-4571-8724-7.

LIPSON, Hod a Melba KURMAN. Fabricated: the new world of 3D printing ; [the promise and peril of a machine that can make (almost) anything]. Indianapolis: Wiley, 2013, xiv, 302 s., [8] obr.příl. : il., ; 22 cm. ISBN 978-1-118-35063-8.

FRANCE, Anna. Make: 3D printing. 1st ed. Sebastopol: Maker Media, 2013, xv, 213 s. : barev. il. ISBN 978-1-4571-8293-8.

CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. 4th edition of Rapid prototyping. Singapore: World Scientific, 2015, xxviii, 518 stran : ilustrace, fotografie. ISBN 978-981-4571-40-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na konstrukci velkoformátové 3D tiskárny. Cílem této práce je návrh a výroba funkčního prototypu tiskárny využívající technologii FDM s využitelnými pracovními rozměry (520 x 520 x 480) mm. Zkonstruovaná tiskárna patří do projektu RepRap tiskáren. Konstrukce stroje je uzavřena s vyhřevem tiskové podložky pro umožnění tisku z materiálů PLA, PET-G a zejména ABS. V práci je provedena rešerše zabývající se metodami 3D tisku z polymerů, dále materiály, tiskovými parametry a technologiemi využívaných u FDM tiskáren. V druhé kapitole je provedena analýza, v níž jsou zhodnoceny poznatky z rešerše a stanoveny důležité parametry ovlivňující kvalitu tisku. V následující kapitole jsou na základě návrhů zvoleny technologie použité pro konstrukci tiskárny. Postup realizace tiskárny včetně doložených pevnostních výpočtů je uveden v konstrukčním řešení. Závěrečná část práce je věnována kalibraci tiskárny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Velkorozměrová 3D tiskárna, FDM, Rapid Prototyping

ABSTRACT

This thesis deals with a construction of a largescale 3D printer. The main goal of the thesis is design and manufacture of functional prototype of FDM 3D printer with a size of building chamber (520 x 520 x 480) mm. Designed printer belongs to the RepRap project. A built of the 3D printer is enclosed with a heated bed. This allows printing from PLA, PET-G and particularly ABS. In the thesis, a research was conducted into 3D printing methods from polymers, materials, printing parameters and technologies of FDM printers. The analysis was carried out in the second chapter, where knowledges from the research were evaluated and determined significant parameters of a printing quality. Final technologies were chosen on the grounds of drafts from previous chapter. The realization of the printer including strength calculations is described in a part of a construction solution. The last section of the thesis deals with a calibration of the printer.

KEY WORDS

Large Scale 3D Printer, FDM, Rapid Prototyping

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BŘEZINA, J. *Konstrukce 3D tiskárny pro velkorozměrové díly*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 85 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že bakalářskou práci *Konstrukce 3D tiskárny pro velkorozměrové díly* jsem vypracoval samostatně, pod vedením doc. Ing. Davida Palouška, Ph.D., s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 19. května 2017

.....
Josef Březina

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení. Dále bych chtěl poděkovat rodině a přítelkyni za podporu a trpělivost. Velké poděkování také patří všem, kteří mi pomohli při práci na zadání.

OBSAH

ÚVOD	15
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	16
1.1 Aditivní technologie	16
1.1.1 FDM – Fused Deposition Modeling	16
1.1.2 SLA – Stereolithography	16
1.1.3 SLS – Selective Laser Sintering	17
1.2 Projekt RepRap	17
1.3 Materiály pro FDM tiskárny	17
1.3.1 ABS	17
1.3.2 PLA	18
1.3.3 PET-G.....	18
1.4 Parametry ovlivňující kvalitu výtisku	18
1.4.1 Povrch a přesnost součástí.....	18
1.4.2 Mechanické vlastnosti	20
1.5 Soustavy souřadnic.....	23
1.6 Typy konstrukcí tiskáren pro FDM	24
1.6.1 Delta konstrukce.....	24
1.6.2 Portálová konstrukce	24
1.6.3 Mostová konstrukce	25
1.6.4 Konstrukce Ultimaker	25
1.6.5 Konstrukce H-Bot	25
1.6.6 Konstrukce Core-XY	25
1.6.7 Polární konstrukce.....	26
1.7 Technologie využívané u FDM tiskáren	27
1.7.1 Motory	27
1.7.2 Zprostředkování pohybu	27
1.7.3 Lineární vedení.....	28
1.7.4 Tisková hlava	28
1.7.5 Tisková podložka	30
1.7.6 Vyhřívání tiskárny	31
1.7.7 Firmware	31
1.7.8 Elektronika a softwarové řízení.....	32
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	33
2.1 Analýza problému	33
2.2 Cíl práce	33
3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ.....	34
3.1 Výběr konstrukce 3D tiskárny.....	34
3.2 Rám tiskárny	34
3.3 Výchřev tiskové plochy	35
3.4 Volba typu vedení a pohonů.....	36
3.5 Krytování stroje.....	36
3.6 Materiály součástí	37
3.7 Elektronika řízení	37

3.8	Kalibrace tiskové plochy	37
3.9	Zhodnocení a výsledné řešení	38
4	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....	39
4.1	Mechanická část	39
4.1.1	Rám tiskárny	39
4.1.2	Uspořádání roviny x, y	40
4.1.3	Výpočet roviny x, y	41
4.1.4	Osa z	45
4.1.5	Výpočet osy z	46
4.1.6	Stůl tiskové podložky	55
4.2	Zapojení elektroniky	57
4.3	Měchový systém	58
4.4	Extrudér	58
4.5	Kabeláž	59
4.6	Kalibrace tiskárny	60
4.6.1	Kalibrace motorů	60
4.6.2	Nastavení kinematických veličin	61
4.6.3	Kalibrace tiskové podložky	62
4.6.4	Ladění tiskových parametrů	63
5	DISKUZE	67
5.1	Shrnutí práce	67
5.2	Ekonomické a časové hledisko práce	67
5.3	Vývoj tiskárny	67
6	ZÁVĚR.....	68
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	69
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	74
9	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	78
10	SEZNAM TABULEK	80
11	SEZNAM PŘÍLOH	81

ÚVOD

Na počátku každé sériové výroby je vždy sestava vymodelována v grafickém prostředí počítače, ale pro ověření funkčnosti dané součásti, její ergonomie, vlastností, nebo vzhledu je vyžadováno vyrobení prototypu. V této fázi výroby je vhodné využití technologií Rapid Prototyping. Avšak tyto technologie je stále obtížné aplikovat pro výrobu velkorozměrných dílů. Důvodem je náročnost technologického procesu, od kterého se odráží cena profesionálních tiskáren. Proto je v této práci zkonstruováno zařízení, které sníží náklady na výrobu při dosažení tiskových rozměrů (520 x 520 x 480) mm. K výrobě takto rozměrných tisků je použita uzavřená konstrukce tiskárny s vyhříváním kovové tiskové platformy.

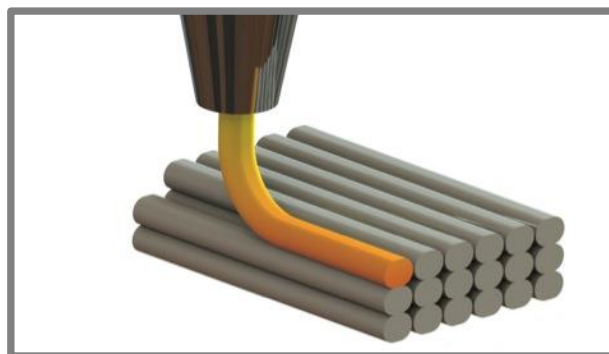
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1 Aditivní technologie

Aditivní technologie (*anglicky Additive Manufacturing; AM*) jsou charakteristické postupným vrstvením materiálu při stavbě modelu a slouží zejména k rychlé výrobě prototypů (RP). (1) Přímou výrobou produktů se zabývá metoda Direct Digital Manufacturing (DDM). Jedná se o přímou výrobu produktů, při které se snižují náklady na obrábění. Umožňuje výrobu topologicky optimalizovaných výrobků a zkracuje dobu mezi návrhem a výrobou součástí. (2) Materiály zpracovatelné těmito technologiemi jsou kovy, keramika, polymerní materiály a sklo. Níže jsou popsány aditivní technologie využívající k tisku polymerní materiály.

1.1.1 FDM – Fused Deposition Modeling

Metoda vyvinutá Scottem Crumpem v roce 1989, kdy dospěl mísením vosku a plastu k potřebnému materiálu pro tuto metodu, kterou dále rozvíjela firma Stratasys. (3) Jedná se o nejrozšířenější technologii. Důvodem je jednoduchost celého procesu tvorby modelu. Celá technologie je velmi podobná CNC frézám, kde namísto vřetena je umístěna tisková hlava. Samotná tisková hlava má za úkol zahřát dodávané plastové vlákno a klást ho na podložku, kde dochází k opětovnému ztuhnutí materiálu. Po vytvoření první vrstvy se vzdálí podložka od hlavy o tloušťku jedné vrstvy a dochází ke stavbě vrstvy další a tím „roste“ model do prostoru.



Obr. 1-1 Schéma metody FDM (4)

Tato metoda vyžaduje stavbu podpor pro převyslé části modelu. U profesionálních tiskáren bývají z odlišného polymeru, než je materiál stavební. Důvodem jsou rozdílné vlastnosti materiálů, které usnadní konečnou úpravu výtisku. Využívá se zejména rozpustnost daného materiálu v jiné látce. Mezi tyto materiály patří například HIPS a PVA. HIPS je polymer rozpustný v látce Lemonesol a slouží jako podpůrný materiál pro ABS. PVA je vhodné ke stavbě podpor pro tisk z PLA. Velkou výhodou je rozpustnost tohoto materiálu ve vodě. (5)

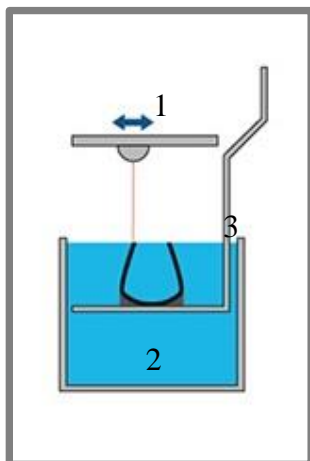
1.1.2 SLA – Stereolithography

Stereolitografie je nejstarší metoda RP. Byla vyvinuta v roce 1986. Tato metoda vytváří model z plastu, který je v tekuté formě. Polymer je postupně nasvícen zdrojem UV světla v místech budoucí součásti, kde dojde k vytvrzení fotosenzitivního materiálu. Před vytvořením další vrstvy dojde ke zvýšení hladiny tekutého plastu o daný rozměr a celý proces se opakuje. (6) Metoda SLA vyžaduje vytváření podpor pro převyslé geometrie. Materiál pro stavbu podpor, na rozdíl od FDM, je totožný se stavebním materiálem modelu. Nevýhody této metody ukazuje tabulka (Tab. 1-1).

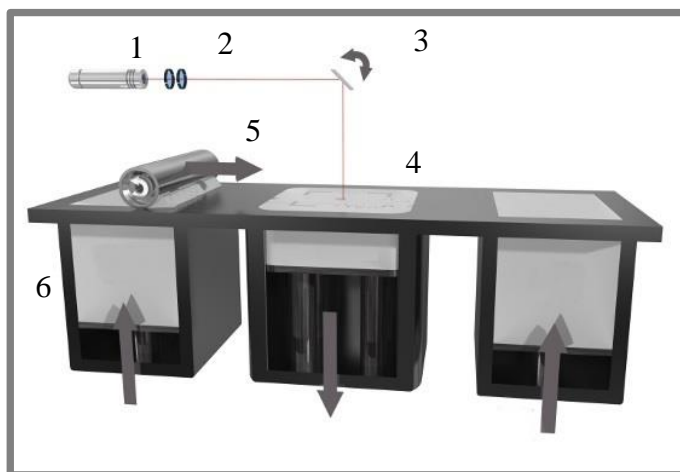
1.1.3 SLS – Selective Laser Sintering

1.1.3

Technologie byla patentována Univerzitou Texas v roce 1987. Komerční využití však našla až v roce 1992, kdy ji představila firma DTM Corporation. (1) K vytvoření třírozměrného modelu využívá metoda SLS vysoce výkonný CO₂ laser, jehož účinkem dochází ke spojení plastového prášku. SLS je vhodné pro geometricky složitá tělesa. Umožňuje stavbu mechanicky pevných dílů odolných vůči zvýšeným teplotám a chemickému prostředí. Laser natavuje vrstvu prášku pouze na předepsaných místech, následně je stavební plocha posunuta o vzdálenost jedné vrstvy níže. Poté dojde k nanesení další vrstvy a celý proces se opakuje. Metoda z principu nevyžaduje stavbu podpor. (7)



Obr. 1-2 Princip metody SLA (1- zdroj UV světla, 2- tekutý polymer, 3 vytvrzený polymer) (8)



Obr. 1-3 Schéma SLS tiskárny (1- laser, 2- optika, 3- skenovací zrcadlo, 4- stavební komora, 5- nanášecí prášku, 6- zásobník s materiálem) (9)

Tab. 1-1 Základní úkony při post-processing (1)

Dokončovací operace	FDM	SLA	SLS
Čištění	X	√	√
Vytvrzení	X	√	X
Dokončování	√	√	√

1.2 Projekt RepRap

1.2

Tento projekt založený anglickým vědcem Adrianem Bowyerem přinesl první nízkonákladovou 3D tiskárnu technologie FDM spojenou s otevřenou licencí konstrukčního řešení, softwarového řízení a sdílením poznatků z oblasti 3D tisku. V dnešní době se jedná o nejrozšířenější typ tiskáren. (10)

1.3 Materiály pro FDM tiskárny

1.3

1.3.1 ABS

1.3.1

Odolný termoplast pevností srovnatelnou s plastovými díly vyráběnými vstřikováním. Teplotně i chemicky odolný. Má vyšší teplotu skelného přechodu a je křehčí než například PLA (viz Tab. 1-2). Je rozpustný v acetonu. (11)(12)(13)

1.3.2 PLA

Tento plast je snadno rozložitelný. Vyrábí se ze škrobu organických látek. Má nízkou teplotu skelného přechodu a díky nízkému teplotnímu součiniteli délkové roztažnosti je zejména používán pro detailní modely. PLA se při vyšších teplotách v kontaktu s vodou depolymerizuje. Další nevýhodou je nízká tepelná vodivost, která má za následek nutnost chlazení vytisknuté části, nebo použití nižší rychlosti tisku (viz Tab. 1-2). (11)(13)(5)

1.3.3 PET-G

Mechanickými vlastnostmi je podobný ABS. Je houževnatější a odolnější vůči opakovanému zahřátí na vyšší teploty. Má menší teplotní roztažnost a nižší teplotu skelného přechodu než ABS, čímž se blíží spíše PLA (viz Tab. 1-2). PET-G je využíván jako obalový materiál zejména pro výrobu měkkých plastových láhví. Nevýhodou je degradace materiálu vlivem UV záření. (13) (14)

Tab. 1-2 Vlastnosti vybraných materiálů pro tisk technologií FDM (pozn. hodnoty v tabulce odpovídají průměru hodnot materiálů dané databáze) (5)

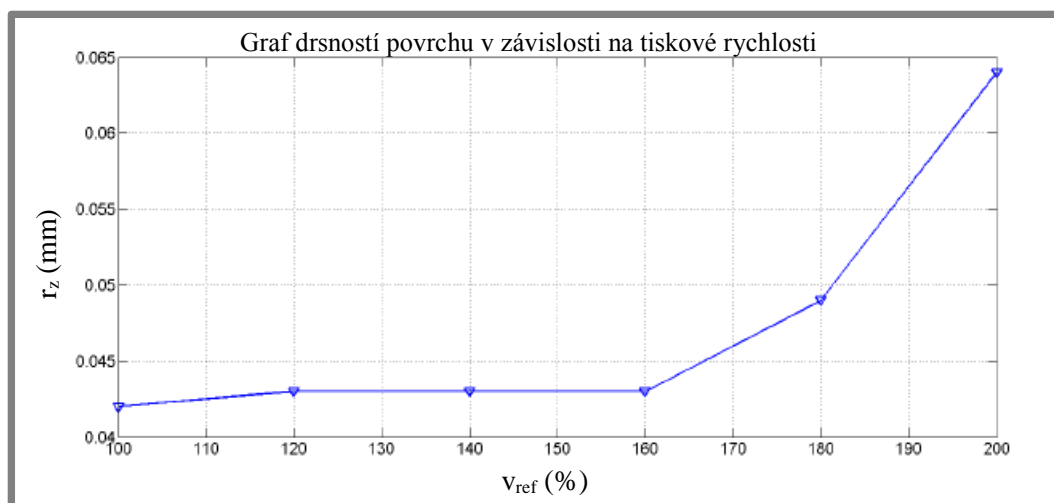
Materiál	Hustota ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Pevnost v tahu R_m (MPa)	Modul pružnosti E (GPa)	Teplotní součinitel dédkové roztažnosti α (K^{-1})	Teplota skelného přechodu T_g ($^{\circ}\text{C}$)
PLA	1,29	50,1	3,76	30	59,6
ABS	1,05	38,2	2,1	87,7	108
PET-G	1,27	38,8	1,95	67,9	80

1.4 Parametry ovlivňující kvalitu výtisku

Každý stroj vyžaduje určitou optimalizaci parametrů. Mezi nastavitelné parametry související s mechanikou stroje patří krokování motorů, tiskové rychlosti, zrychlení a ryv jednotlivých os. Parametry týkající se extrudéru s tiskovou plochou jsou například teplota extruze, teplota tiskové plochy, popřípadě teplota prostoru tiskárny, dále retrakce a chlazení tištěného materiálu. Poslední skupinou jsou nastavitelné veličiny související se strategií stavby materiálu, kam se dá zahrnout výška vrstev, počet perimetrů, druh a hustota výplně modelu a umístění tištěného modelu na tiskovou plochu. Hledání ideálních parametrů tiskárny může být omezeno konstrukcí tiskárny, geometrií tisknutého objektu, nebo nevhodným materiálem filamentu. (15)

1.4.1 Povrch a přesnost součástí

Vlivem nastavení rychlosti tisku na vibrace vlastní tiskárny a následnému vlivu na kvalitu povrchu tisknutého vzorku se zabývali Z. Pilch, J. Domin a A. Szłapa. (16) Z jejich měření vyplývá, že zvyšování tiskové rychlosti tiskárny „Kreator Motion printer“ nad hodnotu 96 mm/s způsobí výrazné zvýšení vibrací tiskové podložky. Zde se patrně nachází vlastní rezonanční frekvence tiskárny. Rozkmitání tiskové podložky však významný vliv na drsnost povrchu nemá.



Graf 1-1 Závislost tiskové rychlosti na rozkmitu tiskové podložky (16)

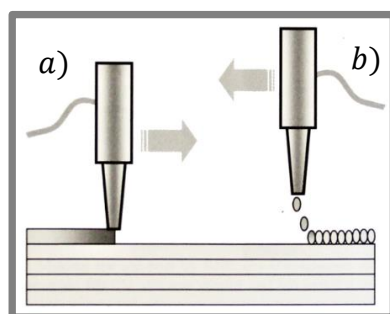
V článku R. Anithy et al. (17) bylo využito statistické metody ke zjištění ideálních tiskových parametrů zkoumané 3D tiskárny. Aplikovali Tagucciho metodu na 18 vzorcích vytvořených kombinacemi 3 parametrů (viz Tab. 1-3), tiskové rychlosti, šířky stěny a výšky vrstvy. Tagucciho metodou přišli na nejvhodnější kombinaci parametrů pro snížení drsnosti povrchu při tisku.

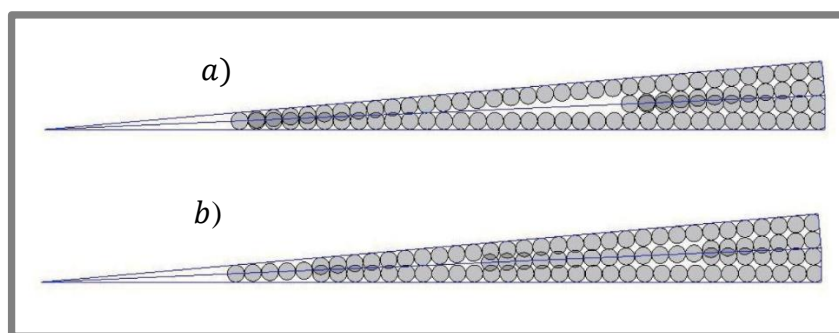
Tab. 1-3 Použité parametry tisku (17)

Parametry tisku			
Výška vrstvy l_h (mm)	0,1778	0,254	0,3556
Průměr trysky d_n (mm)	0,537	0,622	0,706
Rychlost tisku v (mm/s)	100	150	200

Vyhodnocením kvality povrchu dospěli k ideálním tiskovým parametrům $l_h = 0,3556$ mm; $d_n = 0,537$ mm a $v = 200$ mm/s, kdy ukázali, že tisková rychlost stejně jako průměr trysky má minimální vliv na kvalitu povrchu. Zásadní vliv má ale výška vrstvy. (17)

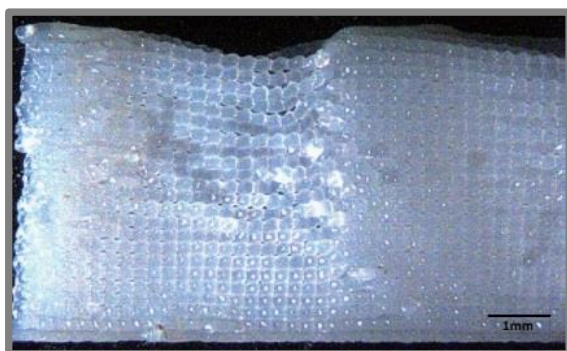
Tvarovou a rozměrovou přesností se zabývala J. Prša a kolektiv. (18) Využili netradiční metody extruze, kdy není vytlačováno kontinuálně vlákno, ale jednotlivé kapky pro dosažení větší výplně modelu zejména v místech s velmi ostrými úhly. Při souvislé výplni je mezi jednotlivými vlákny nevyplněný prostor, který způsobuje tvarovou nestálost v průběhu tisku. Proto bylo vytvořeno několik algoritmů pro optimalizaci výplně a tvarové přesnosti s pomocí kapkové metody.

Obr. 1-4 Druhy extruze metodou FDM
(a) plynulý tisk; b) kladení kapek) (1)

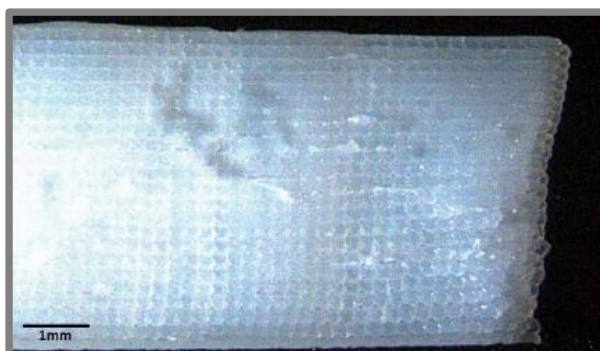


Obr. 1-5 Součást s ostrým úhlem 5° (a) před aplikací optimalizační metody; b) po použití optimalizační metody) (18)

Použitý materiál byl ABS s výškou vrstvy 0,215 mm. Bylo tištěno 23 vrstev, tedy výsledná výška tělesa byla 4,945 mm. Výtisky byly kontrolovány pro zjištění rozměrové a tvarové přesnosti. Výsledky optimálního algoritmu vzhledem ke stavu bez úprav je zobrazen na obrázcích níže (Obr. 1-6 a Obr. 1-7). (18)



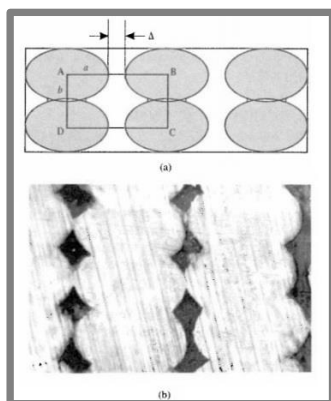
Obr. 1-6 Opakovaný způsob výplně (18)



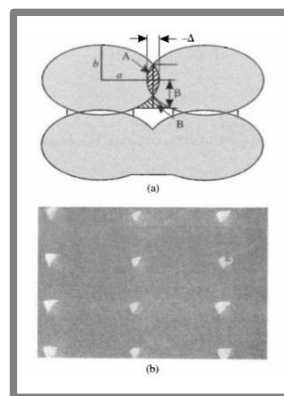
Obr. 1-7 Algoritmus s vkládáním přídavných a odstranění nadbytečných kapek (18)

1.4.2 Mechanické vlastnosti

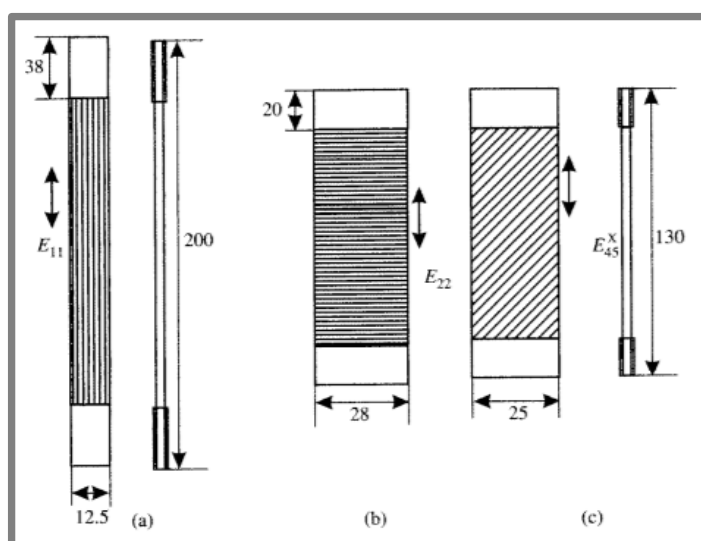
Drsnost povrchu není jediný cíl optimalizace tiskových parametrů. Vlivem geometrie výtisků na mechanické vlastnosti modelů se zabýval L. Li. (19) Technologie tisku metody FDM ve své podstatě vytváří kompozitní materiál. Orientace vláken výtisku ovlivňuje chování v jednotlivých směrech zatěžování. Dalším faktorem je hustota vláken, která může vykazovat dvě geometrie, s kladnou a zápornou mezerou (viz Obr. 1-8, Obr. 1-9). Právě vytvoření matematických modelů se zahrnutím geometrie vláken a porovnání s experimentem bylo cílem jejich snažení. (19)



Obr. 1-8 Kladná mezera vláken – a) teoretický model; b) příčný řez vzorkem (19)



Obr. 1-9 Záporná mezera vláken
a) teoretický model; b) příčný řez vzorkem (19)



Obr. 1-10 Geometrie zkušebního tělesa pro zkoušku tahem (19)

Výsledky ukazují zřejmý trend mechanických vlastností. Tuhost součásti bude ovlivněna nejen orientací vláken, ale také hustoty výplně materiálu. V tabulce uvedené níže (Tab. 1-4) je ukázáno, že součást zatěžovaná po směru vláken má 1,5krát větší modul pružnosti v tahu oproti zatěžování ve směru kolmém. Ze zveřejněných dat vyplývá, že velikost záporné mezery na tento poměr nemá zásadní vliv. (19)

Tab. 1-4 Srovnání teoreticky zjištěných hodnot s experimentálně zjištěnými vzorky (19)

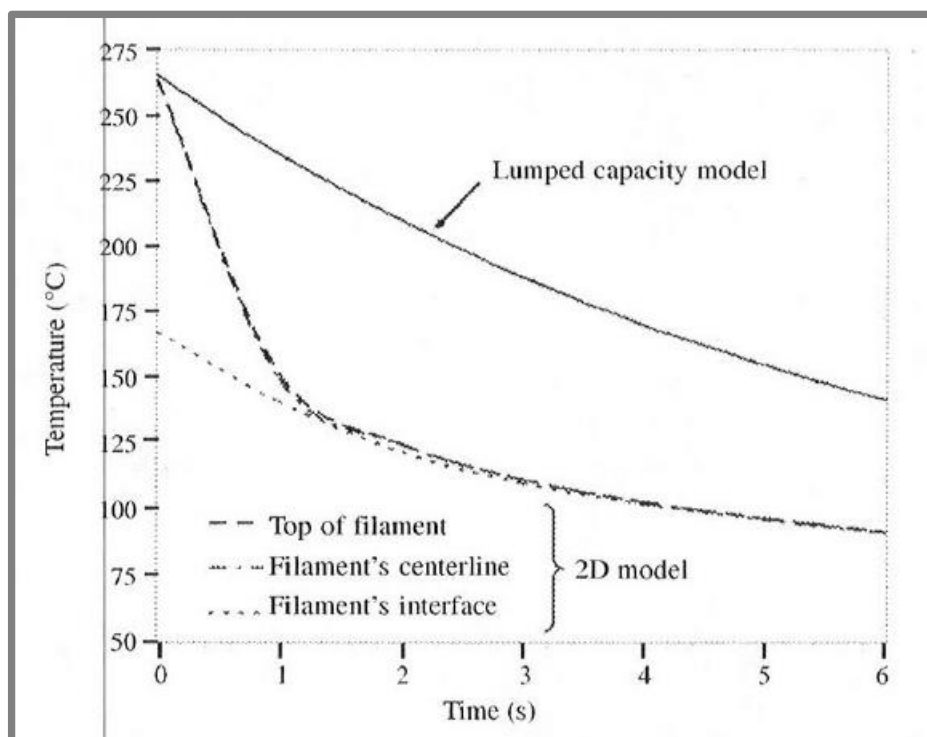
Konstanty	Experimentální měření	Vypočítané hodnoty	Rozdíl [%]
$\Delta = -0,050$ mm			
E_{11} (MPa)	2433,5	2163,1	11,11
E_{22} (MPa)	1631,2	1334,4	5,19
μ_{12} (–)	-	0,34	-
G_{12} (MPa)	460,7	469,4	2
$\Delta = -0,254$ mm			
E_{11} (MPa)	2030,9	2137,7	5,25
E_{22} (MPa)	1251,6	1203,4	3,8
μ_{12} (–)	0,39	0,34	12,8
G_{12} (MPa)	410	416,6	1,6
$\Delta = 0,000$ mm			
E_{11} (MPa)	1743,9	2031,3	16,48
E_{22} (MPa)	0	0	0
μ_{12} (–)	0,42	0,34	19
G_{12} (MPa)	0	0	0
$\Delta = +100$ mm			
E_{11} (MPa)	1664,6	1624,3	4,42
E_{22} (MPa)	0	0	0
μ_{12} (–)	-	0,34	-
G_{12} (MPa)	0	0	0

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{4}{E_{xx}^{45}} - \frac{1}{E_{11}} - \frac{1}{E_{22}} + \frac{2 \cdot \mu}{E_{11}}} \quad (1-1)$$

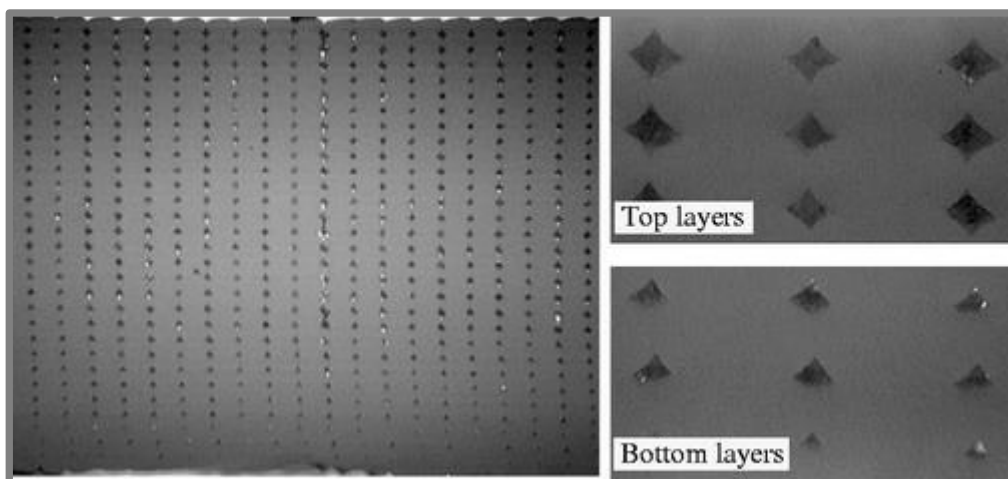
kde:

E_{11}	MPa	je modul pružnosti v tahu vzorku s podélnými vlákny
E_{22}	MPa	- modul pružnosti v tahu vzorku s příčnými vlákny
μ_{12}		- Poissonova konstanta
G_{12}	MPa	- modul pružnosti v ohybu
E_{xx}^{45}	MPa	- modul pružnosti v tahu vzorku s vlákny pod úhlem 45 °
Δ	mm	- rozměr mezery

Vlastnosti vazeb mezi jednotlivými vlákny tisknutého modelu, zejména jejich kvalitou, se zabýval C. Bellehumeur (20). Sledovaným materiálem bylo ABS tisknuté při teplotě 270 °C na podložku o teplotě 70 °C. Model přestupu tepla ověřený měřením ukázal rozložení teploty v průřezu tisknutého vlákna. L. Li (21) přišel ve své dizertační práci k poznatku, že krček, kterým jsou vlákna spojena, nezvětšuje svůj rozměr při teplotách pod 200 °C. Z toho je patrné, že růst krčku vlivem teploty probíhá pouze během krátkého okamžiku po vytištění, přibližně 2 s. Další růst krčku probíhá vlivem tíhového zatížení od vrchních vrstev modelu. Z poznatku C. Bellehumeur (20) vyvozuje zlepšení mechanických vlastností vlivem zvětšení oblasti spojení vláken.



Graf 1-2 Rozložení teploty tištěného vlákna (20)



Obr. 1-11 Řez tisknutou součástí (22)

Úpravy parametrů u specifických konstrukčních provedení budou popsány u příslušných kapitol.

1.5 Soustavy souřadnic

1.5

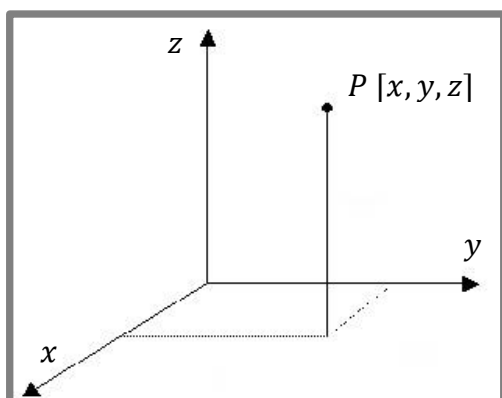
U 3D tiskáren se používají zejména dva souřadné systémy. Jedná se o kartézský souřadný systém a cylindrický.

Kartézský souřadný systém

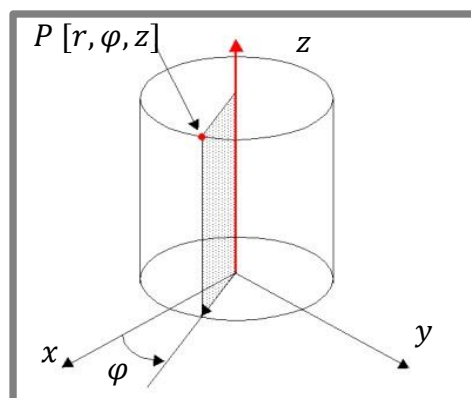
Je definován třemi navzájem kolmými osami protínajícími se v jednom bodě, v počátku souřadného systému. Úseky na osách jsou stejně velké. Využívá pravotočivého souřadného systému. (23)

Cylindrický souřadný systém

Je definován třemi souřadnicemi: r, φ, z . Souřadnice r udává kolmou vzdálenost bodu od osy z . Souřadnice φ udává úhel od průmětu bodu do roviny x, y k ose x . (24)



Obr. 1-12 Kartézský souřadný systém (25)



Obr. 1-13 Cylindrický souřadný systém (26)

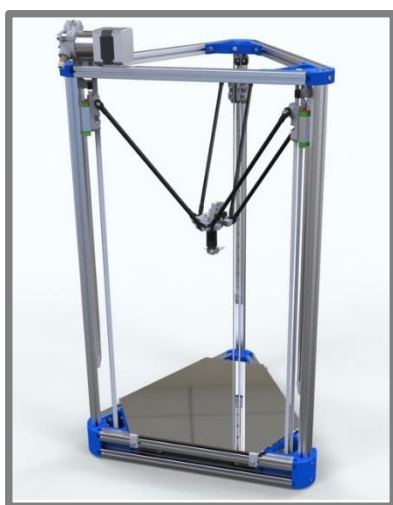
1.6 Typy konstrukcí tiskáren pro FDM

1.6.1 Delta konstrukce

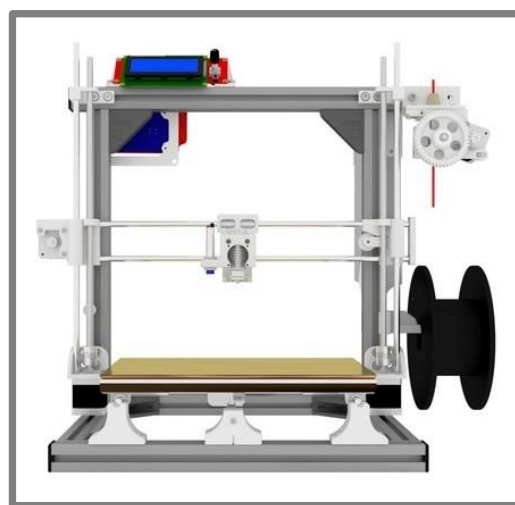
V této konstrukci jsou kinematické členy umístěny paralelně. Celá konstrukce je postavena na 3 ramenech pohybujících se na vzájemně rovnoběžných vedeních, která umožňují vyšší přesnost tisku v rozličných výškách modelu. Použitím tohoto systému jsou kladeny vyšší nároky na řídicí systém, a rozměry tiskárny jsou obecně větší než u ostatních konstrukcí. Uspořádání typu delta je vhodnější pro vyšší objekty s menšími rozměry základny. (6) (27)

1.6.2 Portálová konstrukce

V tomto typu jsou kinematické členy umístěny sériově. Ve svislém směru se pohybuje osa z , na které je umístěna osa s tiskovou hlavou umožňující pohyb ve směru osy x . Osa y je umístěna paralelně ve spodní části tiskárny, kde se nachází tisková podložka. Tištěný díl je tedy vystaven v průběhu tisku cyklickému zatěžování, které je způsobeno zrychlováním a zpomalováním osy y . Sériově napojené členy snižují nejen tuhost tiskárny, ale také její přesnost. Mezi výhody patří snadná konstrukce, malé nároky na řízení a minimalizace potřebného konstrukčního materiálu pro postavení tiskárny. (6)



Obr. 1-14 Rám delta tiskárny Rostock Mini (28)



Obr. 1-15 Portálová tiskárna Scalar (29)

1.6.3 Mostová konstrukce

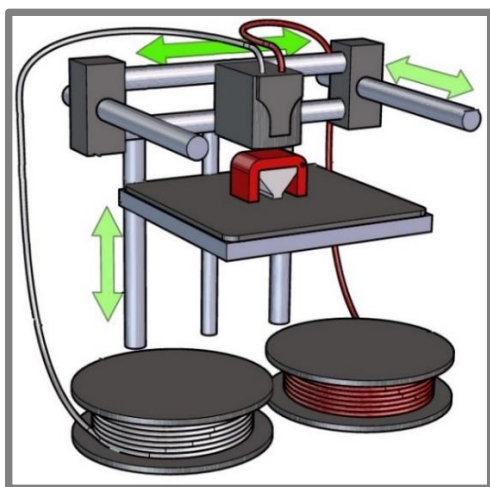
1.6.3

Mostová konstrukce je z kinematického hlediska podobná konstrukci portálové. Liší se pouze jiným uspořádáním jednotlivých členů. Osa z nese tiskovou platformu a na ose y je umístěno rameno, které umožňuje pohyb ve směru x . Tuhost osy x , která je sériově napojená na osu y lze zvýšit použitím druhého lineárního vedení osy y a tím vznikne charakteristický most. Zároveň celý rám tiskárny tvoří kvádr, který umožňuje snadné krytování, popřípadě zvýšení tuhosti stroje. S tímto uspořádáním se můžeme setkat u profesionálních tiskáren.

1.6.4 Konstrukce Ultimaker

1.6.4

Tento systém je podobný konstrukci H-Bot i Core-XY tím, že snižuje setrvačné hmoty na pohyblivých částech. Krokové motory jsou přímo napojeny na vodící tyče, na kterých jsou zároveň umístěny řemenice pro pohyb tiskové hlavy v ose kolmé na dané vedení.



Obr. 1-16 Provedení mostové konstrukce firmy Stratasys (30)



Obr. 1-17 Detail pohonu tiskárny Ultimaker (31)

1.6.5 Konstrukce H-Bot

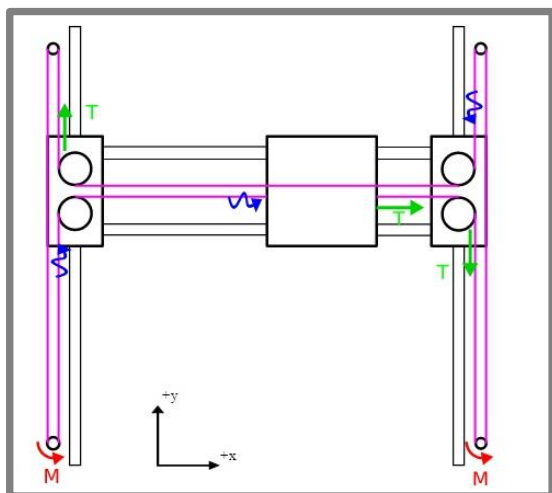
1.6.5

Kinematika této konstrukce je zajímavá zejména použitím pouze jednoho řemenu k pohybu ve dvou osách, nejčastěji x a y . Řemen je poháněn dvěma staticky uloženými krokovými motory. Zde je značná výhoda oproti mostové konstrukci, kde pohon osy x je umístěn na pohyblivém rameni osy y a tím se zvyšují momenty setrvačnosti. Osa z je řešena obdobně jako u mostové konstrukce.

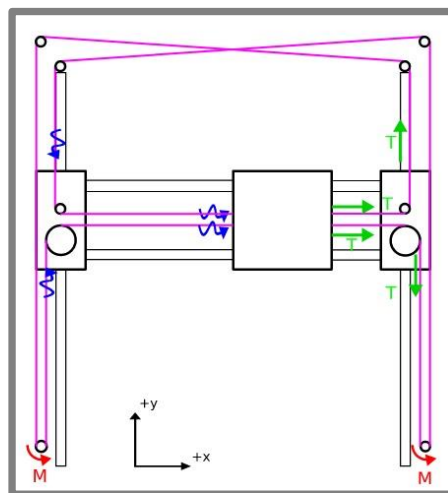
1.6.6 Konstrukce Core-XY

1.6.6

Kinematika Core-XY vznikla z konstrukce H-Bot. Použitím druhého řemene byl eliminován moment vznikající při pohybu v ose x , který mívá za následek snížení životnosti vedení. Tento moment je znázorněn na obrázku (Obr. 1-18) tahovými silami řemene.



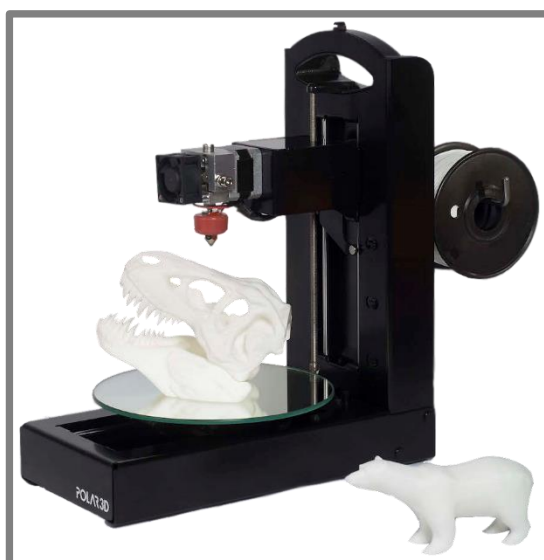
Obr. 1-18 Kinematika H-Bot (32)



Obr. 1-19 Kinematika Core-XY (33)

1.6.7 Polární konstrukce

Tato konstrukce je vhodná pro výrobu rotačních částí. Tisková podložka se natáčí vůči trysce a také koná translační pohyb v radiálním směru. Samotná tisková hlava se pohybuje pouze v ose z . Hlavní výhodou je nízký počet součástí tiskárny, čímž se snižují i výrobní náklady.



Obr. 1-20 Tiskárna Polar 3D využívající polárních souřadnic (34)

1.7 Technologie využívané u FDM tiskáren

1.7

1.7.1 Motory

1.7.1

Je využíváno krokových motorů. Důvodem je malá hmotnost, kompaktní rozměry, a především nízká cena. Nevýhodou těchto pohonů bývají nízké provozní otáčky. Nejčastěji jsou to bipolární motory, které mohou vyvinout větší točivé momenty.

Otáčky běžně dosahované u 3D tiskáren se pohybují při vysokých tiskových rychlostech do 300 min^{-1} (viz rovnice (1-2)), tedy poměrně nízké a přijatelné otáčky pro krokové motory.

$$z = 20$$

$$p = 2 \text{ mm}$$

$$v = 200 \text{ mm/s}$$

$$n = \frac{v}{z \cdot p} = \frac{200 \text{ mm/s}}{20 \cdot 2 \text{ mm}} = 5 \text{ s}^{-1} = 300 \text{ min}^{-1} \quad (1-2)$$

kde:

z		je počet zubů řemenice
p	mm	- rozteč zubů řemene
v	mm/s	- tisková rychlost
n	min^{-1}	- otáčky motoru

1.7.2 Zprostředkování pohybu

1.7.2

Pohyb jednotlivých os je zprostředkován, stejně jako u konvenčních strojů, buď pohybovými šrouby, nebo synchronními řemeny. Existují také aplikace, kdy je využito lano. Pro zvýšení tření mezi řemenicí motoru a samotným lanem je upraven úhel opásání kolem lanového bubnu.

Tyto prvky mají za úkol přeměnit rotační pohyb na lineární. U 3D tiskáren je využíváno kombinací těchto prvků pro zajištění správné funkce stroje.

Kuličkové šrouby

Představují hojně využívaný způsob u obráběcích center. Důvodem použití u tiskáren je vysoká účinnost dosažená valivými elementy mezi maticí a šroubem, vysoká přesnost a tuhost prvku. Pro výrobu tiskáren vycházejících z mostové konstrukce je vhodné použít pro pohon osy z . Pro osy x a y je řešení pomocí pohybových šroubů obecně nevhodné, protože dochází ke zvýšení setrvačných hmot tiskárny.

Trapézové šrouby

Jeden z tradičních typů pohybových šroubů, který vyniká vysokou tuhostí a přesností. Nevýhodou je vyšší tření a vůle v závitech. Stejně jako u kuličkových šroubů, se dá vůle vymezit tzv. předepnutím matice. To má však za následek zvýšení třecích sil. Výhodou oproti kuličkovým šroubům je zejména cena, která se liší u přesných aplikací až o jeden řád. Trapézové závity se opět používají výhradně na pohon osy z .

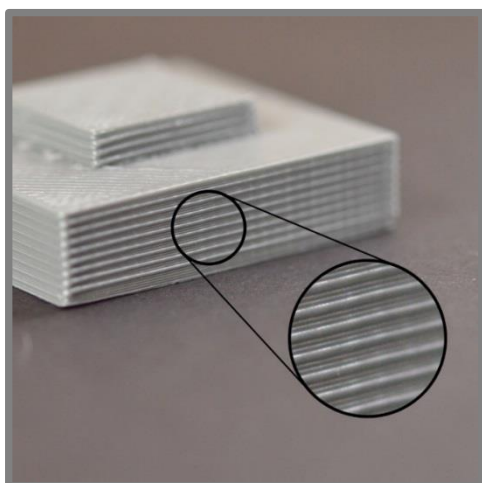
Synchronní řemeny

V současné době jsou nejvyžívanějším prvkem. Vynikají zejména nízkou hmotností, vysokou účinností a přesností pohybu. Synchronnost zajišťují zuby osazené na plochem řemenu. Nevýhodou těchto prvků je nízká tuhost a problém s prodloužením řemenů. (35)

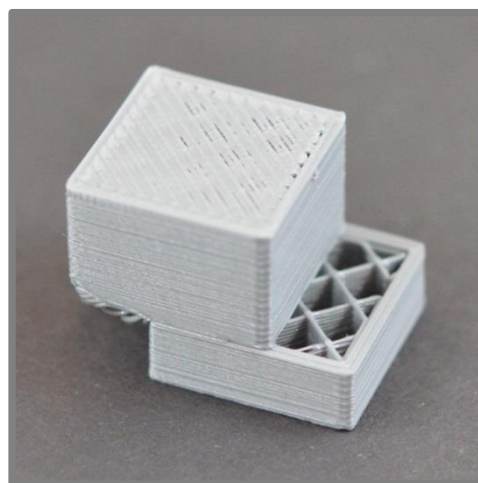
Chyby tisku při použití daného typu pohonu

U pohybových šroubů se mohou projevit nepřesnosti výroby, zejména u přímosti součástí. To má za následek chybu ve vrstvení daného výtisku, kde dochází k opakovanému harmonickému posouvání vrstev vůči sobě v rovině x, y . Tato chyba se projeví na místech vzdálených od sebe vždy o jedno stoupání závitu a nazývá se **wobbling** (česky *kolébání*). (15)

Při použití synchronních řemenů může dojít vlivem pružnosti kordu řemenu a vysokého zrychlení tiskové hlavy k jemným vyboulením na místech změny směru tisku. Častějším problémem bývá nepředepnutý řemen, který následně proklouzne, nebo dojde ke střížení jednotlivých zubů řemenu. Důsledkem může být posun vrstev v jednom směru, tzv. **layer shifting**, nebo úplné selhání tisku. (15)



Obr. 1-21 Wobbling (36)



Obr. 1-22 Layer shifting (37)

1.7.3 Lineární vedení

Na trhu je mnoho druhů lineárních vedení určených k nejrůznějším účelům. U tiskáren se využívá pouze několika z nich, protože síly a momenty přenášené na tiskárně jsou poměrně malé. Jedná se o vedení jak s valivými, tak i kluznými elementy.

Kuličkové vedení

Má vysokou účinnost a schopnost přenášet velké klopné momenty při zachování kompaktních rozměrů. Nevýhodou je nutnost podpůrných struktur k upevnění vedení a vyšší pořizovací cena.

Vodící tyče s kuličkovými pouzdry

V tomto případě je nutnost podpůrných struktur eliminována na úkor tuhosti vedení. Cena je ve srovnání s kuličkovým vedením nižší.

Kluzné lineární vedení

Výhodami použití, ať už v provedení s vozíky, nebo pouzdry, jsou snadná údržba, nižší cena a provoz na sucho. Materiály pro vozíky, či pouzdra jsou bronz, mosaz, ale i plastové materiály, které lépe snášejí znečištěné prostředí, a jsou tak prakticky bezúdržbové.

1.7.4 Tisková hlava

Tisková hlava se skládá z dvou hlavních částí: podavače vláknů a hot endu. Rozmístění těchto dvou částí bývá různé. U přímého vedení je podavač umístěn přímo nad hot endem. U bovdenového vedení vláknů je podavač umístěn na rámu tiskárny, tudíž nepřispívá

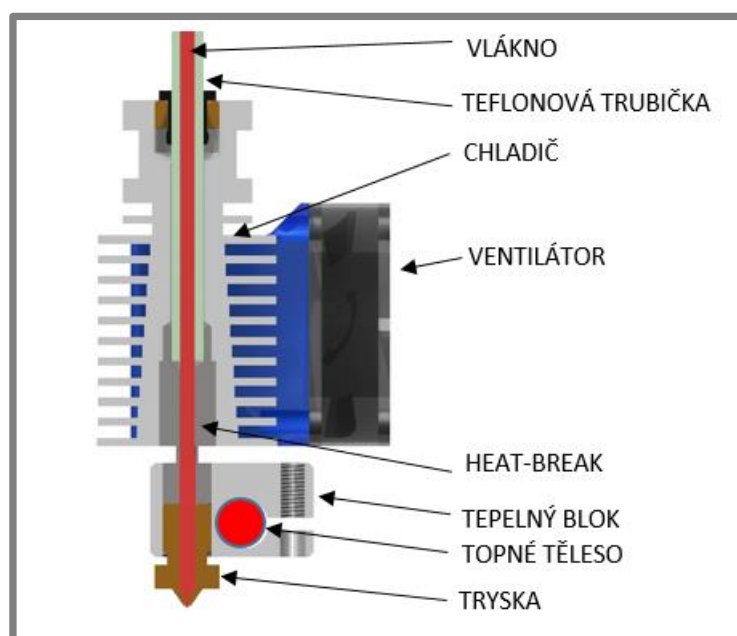
k setrvačným momentům tiskové hlavy. Přímé vedení je výhodnější u flexibilních materiálů, které mají tendenci se v bovdenovém vedení kroutit a tím zhoršit kvalitu tisku.

Podavač vlákna

pohání pastorek globoidního tvaru (zpravidla rýhované globoidní kolo). Tento pastorek slouží k posunu filamentu dále do tiskové hlavy. Proti zabírajícímu ozubenému kolu je usazeno ložisko sloužící k vedení vlákna a regulaci přítlaku k pastorku. Krokování motoru není obvykle dostatečně jemné, proto otáčky rádlovaného pastorku musí být převodovány pomocí jednoduchého soukolí.

Hot end

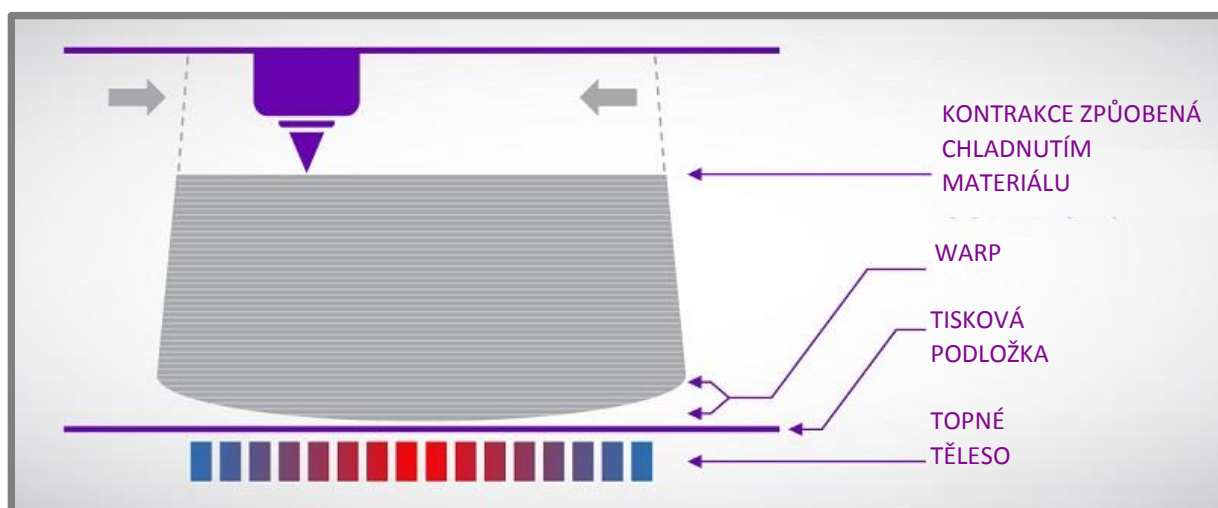
Ekvivalentní české slovo neexistuje, ale anglický název vystihuje přesně funkci součásti (*český překlad „horký konec“*). Tato část tiskové hlavy (*angl. extruder*) má za úkol zahřát vlákno nad teplotu skelného přechodu a vytlačit z trysky ven. Je složena z několika částí lišících se druhem hot endu, avšak principy fungování jsou obdobné.



Obr. 1-23 Řez hot endem (38)

Na konci hot endu je, jak již bylo zmíněno, tryska. Průměry otvoru trysky jsou obvykle od 0,2 mm do 0,8 mm podle požadované textury výtisku. Tryska je upevněna v tepelném bloku, který má za úkol roztavit daný materiál. Tepelný blok je vyroben nejčastěji z hliníkové slitiny a je vyhříván odporovým tělesem. Nad tepelným blokem je umístěn tzv. heat-break. Jeho účelem je zamezení šíření tepla do vyšších částí hot endu, kde by docházelo k natavení vlákna na stěny tiskové hlavy a následnému ucpání extruderu. Materiálem využívaným pro výrobu heat-breaku, je proto nerezová ocel, nebo PEEK plast. Tato součást spojuje tepelný blok s chladičem, kde je odváděno přebytečné teplo. Chladič je obvykle žebrovaná hliníková součást chlazená proudem vzduchu od ventilátoru. V současné době se vyrábějí také vodou chlazené varianty. To má výhodu v dobrém odvodu tepla, ale zvyšuje hmotnost tiskové hlavy. Uvnitř chladiče bývá vlákno vedeno v trubičce z PTFE, která má s plastovým filamentem malý koeficient tření.

1.7.5 Tisková podložka



Obr. 1-24 Znárodnění tepelného smrštění výtisku (39)

Použitým materiálem a jeho povrchovou úpravou se dá snížit pravděpodobnost selhání tisku z důvodu teplotního smrštění tisknutého materiálu, tzv. **warp** (český překlad „zkroucení“). (15)

Tiskové podložky jsou nejčastěji ze skla, hliníku a nejrůznějších druhů plastů.

Sklo

Levný a dostupný materiál, který má malý koeficient teplotní roztažnosti. Používá se u levných tiskáren. Je nevhodný pro použití u větších rozměrů tiskové plochy, kde vlivem nerovnoměrného zahřívání dochází k trvalému poškození skla.

Hliníkové desky

Hliník je materiál, který vykazuje vysokou tepelnou vodivost, která je vhodná u konstrukcí tiskáren s vyhříváními podložkami, nebo komorami. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena a nízká tvrdost materiálu.

Plastové podložky

Jsou využívány u profesionálních strojů. Díky podobným vlastnostem jako má tisknutý materiál, jsou nejvhodnější variantou pro tisk. Mezi další výhody patří možnost vyjmutí podložky s výtiskem z tiskárny a nízká pořizovací cena. Nevýhody této podložky spočívají například v její nízké tuhosti, kdy může dojít ke zdeformování díky tepelnému působení výtisku, nebo při odstraňování výtisku z podložky.

Povrchové úpravy podložek

Jedná se například o lepení různých druhů pásek na tiskovou plochu, jako je kaptonová páska, modrá maskovací páska a jiné, dále chemické přípravky, jako jsou rozpuštěný plast ABS v acetonu, nebo tyčinkové lepidlo. Lze využít i perforované tiskové plochy.

Pro snazší odstranění výtisků z podložek jsou v současné době tiskárny osazovány pružnými podložkami, které jsou odnímatelné od podložky. Upevněny bývají magneticky, nebo mechanicky (svorky, drážky s indexy).

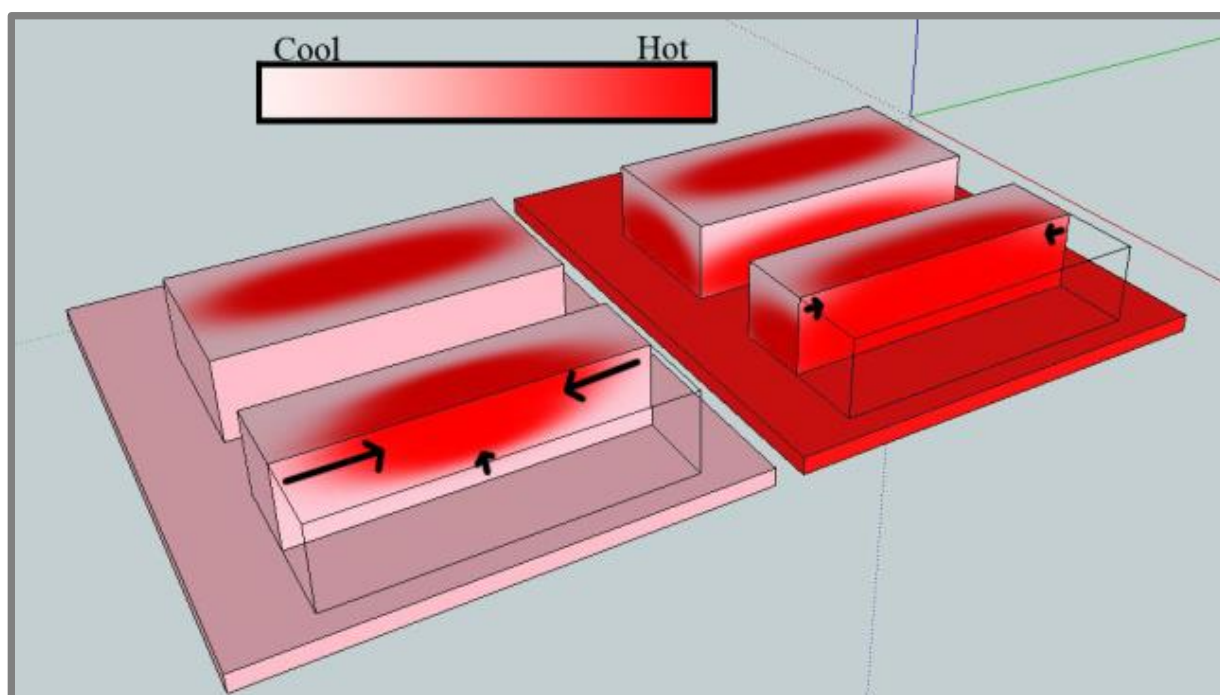
1.7.6 Vyhřívání tiskárny

1.7.6

U plastů s vyšším koeficientem teplotní roztažnosti (smrštivosti) a vysokou teplotou skelného přechodu je vyžadována zvýšená teplota prostředí, ve kterém se daná součást tiskne. Důvodem je snížení teplotního rozdílu tisknutého a již vtištěného materiálu, tedy snížení vnitřního pnutí způsobeného teplotou.

V současné době se využívají dva principy vyhřívání. První je vyhřívání prostor tiskárny. Jeho hlavní výhodou je konstantní teplota při samotném tisku. Druhá konstrukce má vyhřívanou tiskovou podložku. Zde je zajištěna vyšší teplota potřebná ke spojení tisknutého materiálu s podložkou. S přibývajícím výškou výtisku roste vnitřní pnutí z důvodu gradientu teplot. Pokud je tiskový prostor tiskárny uzavřen, teplota v prostoru tiskárny se vyrovná a rozdíly mezi vyhřívanou komorou a vyhřívanou podložkou se minimalizují.

Na obrázku níže (Obr. 1-25) jsou simulovány dva stejné výtisky při odlišných podmínkách tisku. Na levé straně je vytisknutý hranol umístěn na nevyhřívané podložce, na pravé straně je na podložce vyhříván. Barvy znázorňují teplotní rozložení a šipky ukazují vnesené vnitřní napětí. (40)



Obr. 1-25 Znázornění vnitřního pnutí výtisků (40)

1.7.7 Firmware

1.7.7

Pro tiskárny projektu RepRap jsou nejčastěji využívány dvě možnosti, firmware Marlin a Repetier.

Firmware Repetier má uživatelsky příjemnější prostředí, kde pomocí webového rozhraní uživatel vybírá z nabízených možností. Nevýhodou je při drobných úpravách nutnost nahrát stávající program na webovou stránku, jinak by uživatel musel využít programátorského prostředí, kde nejsou uvedeny komentáře k jednotlivým funkcím.

Firmware Marlin je v přímém kontrastu s prostředím Repetier. Uživatel při využití Marlin musí nastavit tiskárnu v programu od společnosti Arduino, ale celý proces je usnadněn mnoha komentáři k jednotlivým sekcím a předpřipravenými programy.

1.7.8 Elektronika a softwarové řízení

Model vytvořený pomocí 3D modeláře a uložený nejčastěji ve formátu .stl (STereoLithography (1)) je následně zpracován v programu, tzv. sliceru. Tento program má za úkol vytvořit G-kód, který bude obsahovat dráhy tiskové hlavy a parametry tisku. Slicer je buď dodáván přímo se zakoupenou 3D tiskárnou od výrobce a je tedy uzpůsobený danému stroji, nebo existují verze pro vlastní konstrukce tiskáren, například Slic3r, Cura, Kisslicer, apod. Ty umožňují přizpůsobení programu pro rozměry stavební plochy a dalším individuálním nastavením.

Mezi jednotlivými slicery jsou velké rozdíly v grafickém zpracování, možnosti využití internetového prohlížeče pro vytvoření kódu, v množství nastavitelných parametrů. Nezanedbatelné je i to, zda se jedná o zpoplatněnou verzi. Je obtížné porovnávat jednotlivé programy ve výsledcích tisků, protože každá tiskárna vyžaduje specifické nastavení a tím pádem lze různými softwary dojít k přijatelným a vzájemně srovnatelným výsledkům.

Vytvořený G-kód je dále poskytnut řídicí elektronice. Ta je u vlastních konstrukcí postavena nejčastěji na programovatelných jednotkách jako je Arduino, nebo Raspberry Pi. K nim je přidružena další deska, tzv. shield, která umožňuje snadné připojení jednotlivých periférií, jako jsou krokové motory, koncové snímače, topné články nebo snímače teploty. Další možnosti jsou řídicí jednotky, např. RAMBO, které jsou konstruovány přímo pro účely 3D tiskáren a tak odpadají problémy s nutností zakoupení mikropočítače a řešením problémů s nedostatkem prostoru pro nastavbové součásti.

Zakoupení konkrétní řídicí elektroniky ovlivňuje nejčastěji cena, frekvence procesoru, množství použitelných řadičů motorů a podporované funkce, jako je použití SD karty a grafického displeje, či počet termistorů.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2

2.1 Analýza problému

2.1

Z provedené rešerše je patrné, že už výběr konstrukčního uspořádání 3D tiskárny ovlivňuje vlastnosti tisku. Je nutné věnovat pozornost výběru nakupovaných komponentů, protože přímo ovlivňují přesnost tiskárny. Při následné montáži je potřeba dodržet požadované geometrické tolerance, aby byla zajištěna správná funkčnost stroje. Výběr elektroniky je potřeba uzpůsobit součástem, které splňují požadavky pro danou konstrukci tiskárny, zejména výběru pohonů. Ty mohou zvýšit rychlosti a zrychlení pohybů tiskové hlavy, čímž umožní kratší doby tisku. Využívané materiály by měly být předem specifikovány, protože vyžadují různé tiskové podmínky, kterých tiskárna musí dosáhnout. Mezi tyto parametry patří například vyhřívání tiskové plochy, kde materiál PLA nevyžaduje zvýšenou teplotu podložky oproti materiálu ABS. Způsob dopravy filamentu do trysky ovlivní hmotnost pohyblivých částí a zároveň u rozměrných tiskáren ovlivňuje konstantní rychlost materiálu dodávaného do tiskové hlavy. Tiskové parametry musí být zkalibrovány pro daný materiál a musí být provedeny zkušební tisky pro zajištění tvarové a rozměrové přesnosti. Pro tiskárnu velkorozměrných dílů je nutné zvolit vhodnou variantu řešení, navrhnout ji, vyrobit a otestovat.

2.2 Cíl práce

2.2

Sestavit 3D tiskárnu pro tisk polymerních materiálů o velikosti pracovního prostoru (500 x 500 x 400) mm.

Dílčí cíle bakalářské práce jsou:

- návrh variant řešení
- výběr finální konstrukce
- vytvoření seznamu dílů
- realizace výroby
- ověření funkce na stavbě konkrétního dílu

3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

V této kapitole se pojednává o možném řešení, návrzích a použitelných technologiích při konstrukci specifické 3D tiskárny.

3.1 Výběr konstrukce 3D tiskárny

Bylo vybíráno z několika typů konstrukcí. Mezi ně patřila mostová konstrukce, H-Bot, Core-XY a Ultimaker. Všechny tyto druhy konstrukcí mají jednu společnou vlastnost – byly zkonstruovány pro snížení hmotnosti pohyblivých částí a zvýšení tuhosti konstrukce, což je zejména u velkoformátových tiskáren velice výhodné, protože větší rozměry nesou s sebou i větší hmotnost.

Použití konstrukce od firmy Ultimaker nebylo vhodné, protože hlavní požadavek, tedy snížení setrvačných hmot, se projevuje pouze u menších rozměrů 3D tiskáren. Pokud by vzrostly rozměry tiskové plochy, musely by narůst také průměry vodících tyčí pro zachování tuhosti stroje a tím by vzrostly momenty setrvačnosti.

Obvyklou volbou by bylo použití mostové konstrukce, ale při snaze zachování nízkých hmot pohyblivých součástí se tato varianta také nejeví jako ideální.

Proto bylo voleno pouze mezi kinematikami H-Bot a Core-XY. Byla vybrána verze Core-XY, protože zajímavé uspořádání s dvěma závislými řemeny umožňuje snížit nepřesnosti tisku.

3.2 Rám tiskárny

Při konstrukci jsou nejčastěji používány dvě varianty – rám z plechů, nebo užití hliníkových stavebních profilů. Jako další možnost se naskytl rám sestavený ze svařovaných segmentů.

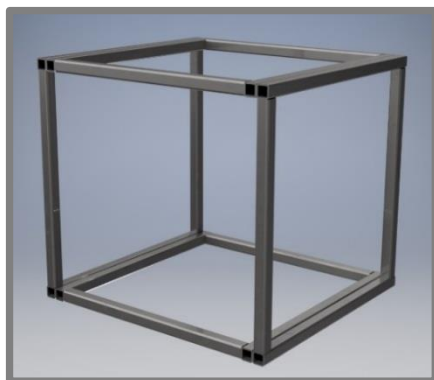
Rám sestavený z pálených plechů je řešení snadné na montáž. Technologie výroby je velmi přesná a tuhost konstrukce je závislá na tloušťce plechu, tvaru součásti a případných dalších konstrukčních zásadách. Nevýhodou je nutnost součinnosti více výrobních oddělení, jako je dílna s pálicími zařízeními a lisovna.

Rám z ocelových profilů by byl sestaven z jednotlivých segmentů. Segmenty by byly svařeny z konstrukčních profilů a následně obrobena. Zdánlivě jednoduché řešení však s sebou nese nutnost obrábění funkčních ploch. Tato operace by v případě sériové výroby celý proces prodražila a při výrobě prototypu pozdržela vývoj právě z důvodu časově náročného obrábění.

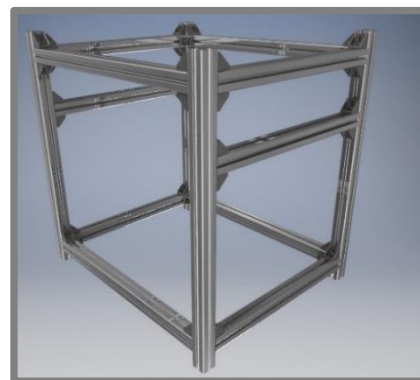
Hliníkové stavební profily jsou vhodným řešením pro výrobu strojů k jednoúčelovému použití, popřípadě k výrobě prototypů. Zde je však velmi limitující cena, která bývá v závislosti na výrobci 10x vyšší než u ocelových profilů.



Obr. 3-1 Rám
z ocelových plechů



Obr. 3-2 Ocelový rám



Obr. 3-3 Rám z hliníkových profilů

3.3 Výhřev tiskové plochy

Z rešerše jsou jasné patrné možnosti výhřevu tiskárny, avšak již v této fázi byly některé technologie vyloučeny. Jednou z nich je výhřev prostoru tiskárny pomocí externích topných těles. Omezujícím parametrem bylo množství komponentů, které by danému teplotnímu zatížení podléhaly. To by zvýšilo neúměrně cenu tiskárny vzhledem k prototypové výrobě. Proto se volilo mezi vyhřívanými podložkami.

Mezi uvažovaná řešení patřily PCB desky. Zde by však bylo nutné skládat několik desek pod tiskovou plochu, poněvadž leptání rozměrného jednoho kusu PCB desky není technologicky možné.

Dalším řešením by byly silikonové topné fólie. Zde se vyrábí několik rozměrových skupin. Užití fólie potřebné velikosti by bylo opět obtížné, protože by neměla potřebný výkon, nebo by se i v tomto případě muselo použít několik silikonových fólií menších rozměrů.



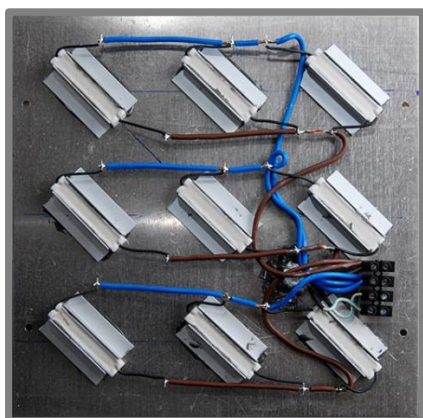
Obr. 3-4 PCB topná deska pro RepRap (41)



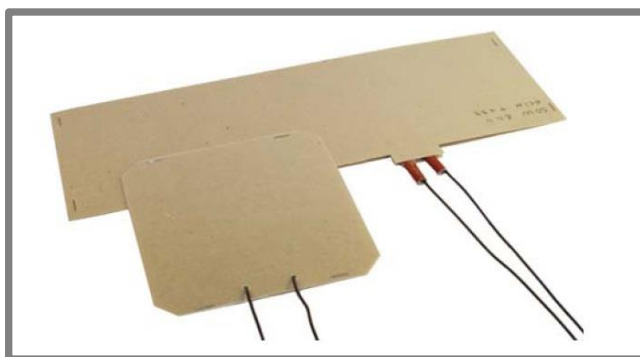
Obr. 3-5 Silikonová topná deska (42)

Běžně používané jsou výkonové odpory připevněné na hliníkové desce. Snadné řešení, které ovšem nedokáže udržet konstantní teplotu desky po celé ploše.

Jedna z ne zcela běžně používaných variant je slídová deska. Tyto desky se využívají pro vytápění forem vstřikovacích lisů. Jejich výhodou je možnost výroby rozměrů na zakázku a velké výkony topného tělesa. Komplikací může být nutnost užití napájení střídavým napětím ze sítě.



Obr. 3-6 Deska s topnými odpory (43)



Obr. 3-7 Topná slídová deska (44)

3.4 Volba typu vedení a pohonů

V úvahu přichází několik druhů vedení. Bylo vybíráno mezi vodícími tyčemi, ať už s kluznými, nebo kuličkovými pouzdry a lineárními vedeními.

Tisková rovina x, y vyžaduje druh vedení, které bude mít dobrou ohybovou tuhost a zároveň nízkou hmotnost. Na ose z není nízká hmotnost vyžadována, změnou konstrukce a upravením rozměrů vedení se dá dojít k optimálnímu řešení. Proto zde je zohledněna především cena komponentů.

Tabulka uvedená níže (Tab. 3-1) znázorňuje charakteristiky zvažovaných řešení. Jsou zde uvedena dostupná lineární vedení od firmy THK, která musí být upevněna na nosný prvek, v tomto případě na hliníkový stavebnicový profil Alutec KK 30. Jako druhé řešení je popsáno použití dvou vodících tyčí z kalené oceli C45 o průměru 12 mm. Uvedené vlastnosti jsou pro kompletní uvažované řešení.

Jak je vidět ze specifické tuhosti v tabulce (Tab. 3-1), při použití hliníkové slitiny a oceli je tuhost součásti stejného průřezu vztažená na její hmotnost téměř totožná. Zde je výhoda nosných hliníkových profilů v geometrii průřezu. Ta zajišťuje větší kvadratický moment než kruhový průřez vodící tyče, proto ohybová tuhost je znatelně větší. Výhodou použití ocelových tyčí je nízká cena a nižší hmotnost. Při uvážení použití, kde je vyžadována také tuhost stroje, se jako lepší řešení jeví lineární vedení.

Tab. 3-1 Charakteristiky lineárních vedení pro osu x (45)(46)

	hmotnost m (kg)	ohybová tuhost ($E \cdot J$) ($10^9 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^4$)	specifická tuhost (E/ρ) ($\text{MPa} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3$)	cena (Kč)
Lineární vedení THK HSR 15 na hliníkovém profilu (30 x 30) mm	1,4	1,7	25,9	700
2 ocelové vodící tyče o průměru 12 mm	1,35	0,2	26,8	300

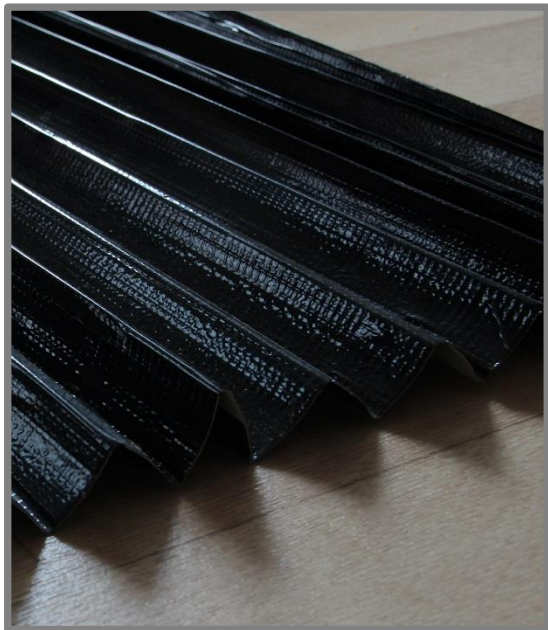
3.5 Krytování stroje

Krytování stroje je obvykle pouze designovou záležitostí výrobku, u 3D tiskárny však hraje zásadní roli v izolaci výtisku od okolí tak, aby nedocházelo k nepředvídatelnému kolísání teploty prostoru.

Vhodné jsou především materiály s odolností vůči zvýšeným teplotám a nízkou teplotní vodivostí. Proto například není vhodné využít ocelové plechy, protože jsou dobrými vodiči tepla a mohly by pro obsluhu znamenat nebezpečí popálení. Z tohoto důvodu jsou vhodnější plastové desky, které ale nejsou obecně použitelné pro prostředí se zvýšenými teplotami. Další variantou je dřevo, popřípadě dřevěná překližka. Tyto suroviny splňují oba požadavky.

Pro zakrytování horní strany tiskárny se nabízejí dvě varianty. První je užití desky, čímž by veškeré komponenty tiskárny byly uzavřeny v prostoru se zvýšenou teplotou, nebo použití měchů, které oddělí větší část součástí od tiskového prostoru a nebudou tepelně ovlivněny. K dispozici je možnost výroby tvarově složitější součásti výrobou vakuového formování plastů. Tato metoda ale nebude použita z důvodu časové náročnosti výroby formy. Konečným rozhodnutím je využití měchového systému, proto proběhl vývoj konstrukce měchů. Zásadním problémem je cenově dostupný materiál. Nabízejí se možnosti technické tkaniny, slepovaných hliníkových lamel průmyslovou páskou nebo skládané měchy z tvrzeného papíru. Nejvhodnějším řešením z hlediska hmotnosti, odolnosti vůči teplotě a zpracovatelnosti jsou

technické tkaniny, avšak přesnost dostupné technologie výroby měchů není dostačující. Proto byly vyrobeny prototypy zbylých dvou variant, z nichž vhodnější byla vybrána a následně použita.



Obr. 3- 8 Slepované hliníkové lamely



Obr. 3- 9 Skládané papírové měchy

3.6 Materiály součástí

3.6

U většiny prototypových tiskáren je mnoho dílů vyrobeno z plastů pomocí 3D tisku. Avšak tyto součásti mají nízkou tuhost a podléhají rychlé degradaci mechanických vlastností. Proto bylo přistoupeno k hledání materiálů a prostředků výroby, kterými by se dalo nahradit výrobky z polymerů. Pro jednotlivé součásti byly zvoleny slitiny hliníku, popřípadě ocelové polotovary.

3.7 Elektronika řízení

3.7

Z mnoha druhů řídicí elektroniky byla vybrána ta nejpoužívanější, tedy programovatelný počítač Arduino s deskou RAMPS 1.4. Důvodem, proč mnoho uživatelů nepoužívá tuto desku, je zejména nemožnost použití vývodů na desce Arduino zakrytých deskou RAMPS. Vzhledem k tomu, že tato tiskárna bude sloužit pouze k účelům, pro něž je „shield“ RAMPS navrhnut, není potřeba pořizovat složitější elektroniku.

3.8 Kalibrace tiskové plochy

3.8

Bylo zvažováno několik možností kalibrace tiskové plochy. Patřily mezi ně manuální kalibrace pomocí mechanických prvků jako jsou šrouby a distanční podložky, a dále využití senzoru pro zjištění křivosti dané plochy a následnému softwarovému rovnání. Není výjimkou kombinace obou způsobů, protože obě metody jsou vhodné k rozdílným účelům.

Výhodou mechanické kalibrace je snadná obsluha, která je však časově náročná. Přesnost metody se odvíjí od rozměrů kalibrované plochy a použité konstrukce. Mechanická kalibrace je vhodná pro malé rovné tiskové plochy, kde se pomocí prvků ustaví pouze rovina tisku.

Senzorické řízení je vhodné použít u tiskáren, které jsou určeny pro sériovou výrobu dílů tak, aby nebylo nutné obsluhy stroje. Přesnost se odvíjí od použitého typu senzoru, popřípadě hustoty kalibrační sítě.

Vzhledem k zachování nízkých nákladů a nízké hmotnosti pohyblivých částí byla zvolena kombinace mechanické kalibrace s využitím softwarového rovnání tiskové plochy při známých odchylkách. K tomu slouží kalibrační cyklus, který vyžaduje spolupráci obsluhy s tiskárnou. Jsou zaznamenávány odchylky od nulové pozice tiskové hlavy.

3.9 Zhodnocení a výsledné řešení

U tiskárny, která je předmětem práce, bude použita konstrukce Core-XY, která je vhodná pro variantu velkoformátové tiskárny. Na této konstrukci je možné postavit tuhý rám stroje, který bude vyroben z modulárních hliníkových profilů. Ty umožní snadné konstrukční zásahy a možnost vedení kabelů v drážkách samotných profilů.

Pro lineární pohyb jsou zakomponována lineární vozíčková vedení THK HSR15. Jejich cenové zatížení pro výrobu bude sníženo zakoupením již použitých komponentů. Ty budou využity pro pohyb tiskové hlavy. Podložka bude vedena pomocí čtyř kalených tyčí z materiálu C45 o průměru 12 mm a poháněna trapézovými šrouby Tr12x3.

Součásti vyžadující pouze vysokou tuhost budou vyrobeny z ocelových pásovin. Hliníkové slitiny budou použity na komponenty vyžadující tuhost, teplotní odolnost a nízkou hmotnost. Části, které nevyžadují specifické vlastnosti je možné postavit 3D tiskem.

Ke snížení setrvačných hmot bude využito bovdenového provedení extrudéru s použitím celokovového hot endu.

Jako tisková podložka byla zvolena hliníková deska vyhřívaná slídovým topným tělesem. K ustanovení tiskové roviny bude použito osm stavících šroubů s podpěrnou deskou v kombinaci s manuálním kalibračním cyklem.

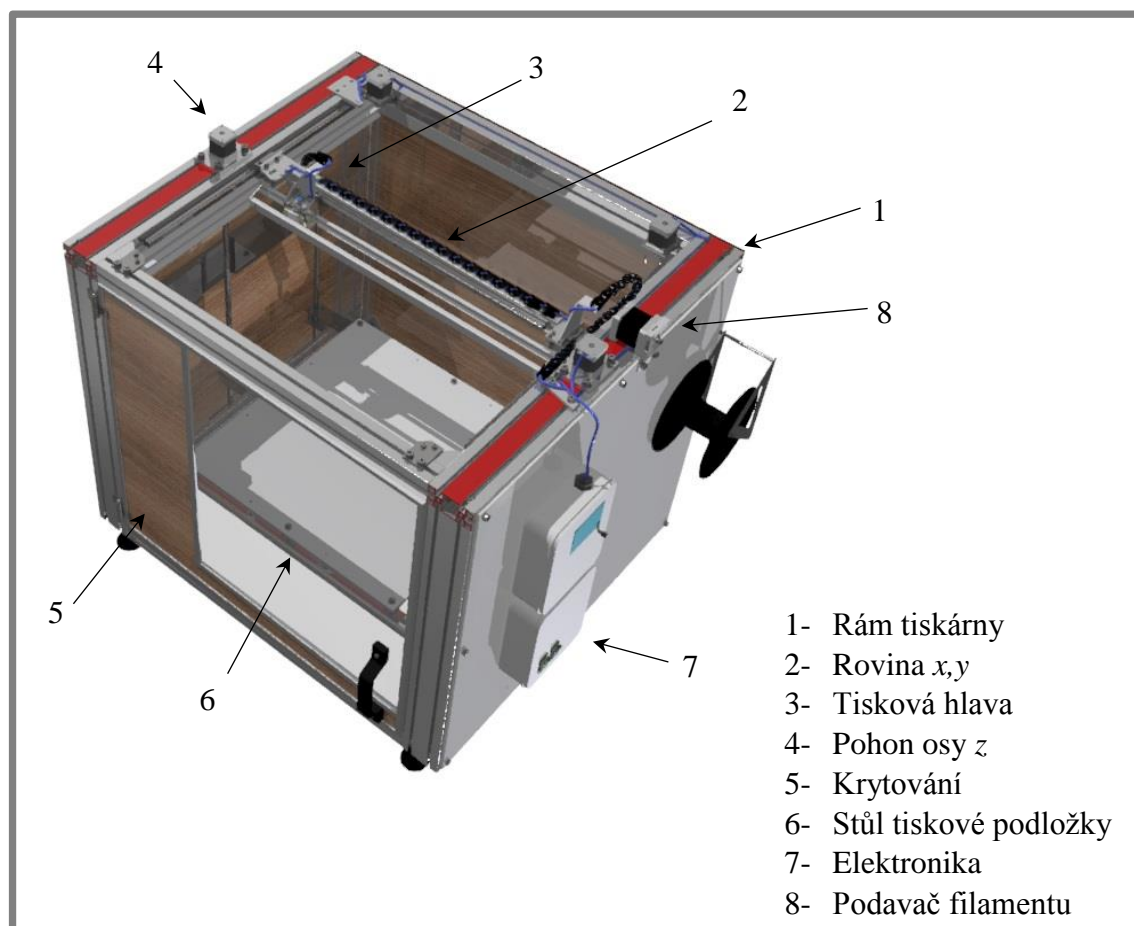
K zakrytování bočnic tiskárny bude využito kombinace dřevotřískových desek a sendvičových desek složených z hliníku a plastového jádra. Kryt vrchní strany tiskárny bude řešen měchovými systémy z tvrzeného papíru.

Elektronika bude postavena na mikropočítači Arduino ATmega 2560 s deskou RAMPS 1.4. Bude využito firmware Marlin z důvodu podpory mechanické kalibrace.

4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

4

Konstrukční vývoj tiskárny lze shrnout do několika částí. V první z nich byla vyvíjena mechanická část tiskárny, kde bylo nutné zajistit tuhost tiskárny a zároveň kinematické stupně volnosti jednotlivých komponentů. V další fázi již probíhalo zapojení řídicí elektroniky s nezbytnými úpravami firmwaru a kalibrace tiskárny. Nakonec byla testovacími výtisky ověřena funkčnost tiskárny.



Obr. 4-1 Model 3D tiskárny

4.1 Mechanická část

4.1

4.1.1 Rám tiskárny

4.1.1

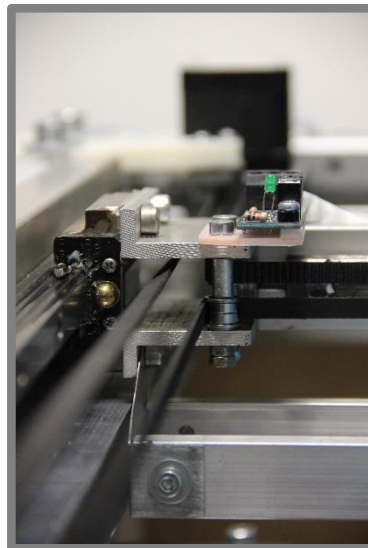
Hliníkové stavebnicové systémy byly zakoupeny u firmy Strojtechnik. Tato firma má v nabídce již použité konstrukční profily. Mezi výhody především patřila nižší pořizovací cena, ale bylo nutno vybírat mezi mechanicky méně poškozenými a tvarově přesnými komponenty. Hliníkové profily byly nařezány a následně broušeny na požadované rozměry. Uložení motorů do nosných profilů vedlo ke zmenšení vnějších rozměrů tiskárny a zároveň působí jako designový prvek (viz Obr. 4-9). K uložení motorů byly použity hliníkové profily o rozměrech (45 x 90) mm. Profily bez konstrukčních zásahů byly vyrobeny z čtvercového průřezu (45 x 45) mm. Spojení jednotlivých profilů bylo provedeno sešroubováním a pro zvýšení tuhosti tiskárny byly v rohových spojích použity úhelníkové spojky. Při návrhu sestavení rámové konstrukce bylo dbáno na snížení počtu profilů vyžadujících zvýšenou přesnost výroby. Důvodem bylo snížení počtu součástí, na kterých je závislá přesnost stroje.

4.1.2 Uspořádání roviny x, y

Použitá lineární vedení THK HSR15 jsou upevněna pomocí šroubů k nosnému profilu. Zde bylo nutné vyrobit matice se závitem M3 a vnějšími rozměry uzpůsobenými drážce hliníkového profilu. Upevnění osy x k vedení je provedeno pomocí dvou mostových součástí, které musí umožňovat průchod řemenů v podélném i příčném směru.

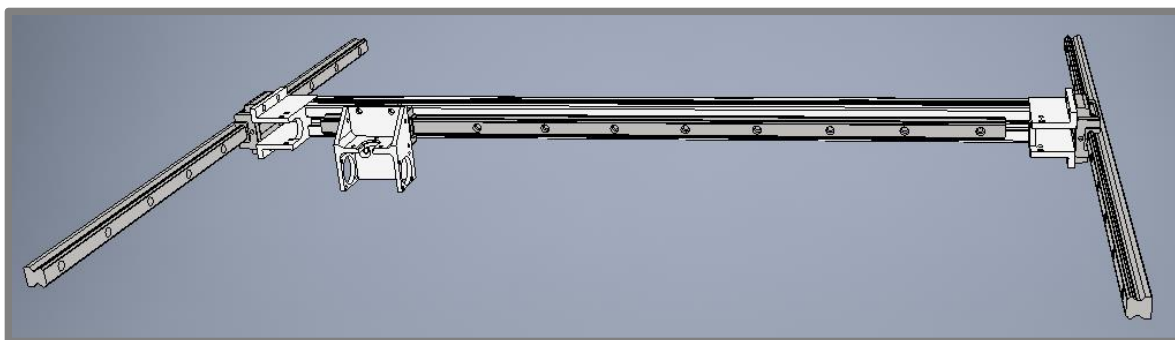


Obr. 4-2 Tisková hlava při montáži měchového systému



Obr. 4-3 Most osazený koncovým spínačem

Hot end je umístěn v nosném rámu, který je konstruován pro umístění krycích měchů, upevnění ventilátoru a umožňuje také předělat systém extrudéru na přímý posun filamentu. Tisková hlava je ovládána pomocí synchronních řemenů GT2, které jsou vedeny přes kladky tvořené vždy dvěma přírubovými ložisky složenými čely k sobě. To zaručuje nízké tření a bezúdržbový provoz. Motory pro pohon osy x a y jsou umístěny na ohnuté platformě z ocelového plechu tloušťky 4 mm a přišroubovány k rámu tiskárny.



Obr. 4-4 Uspořádání roviny x, y

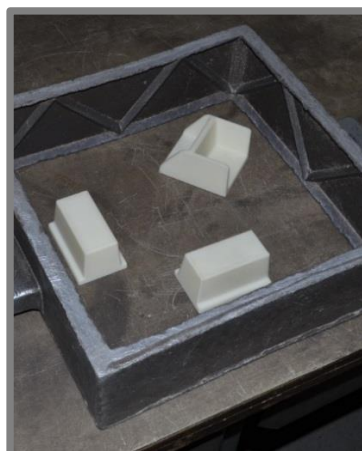
Výroba hliníkových součástí pro rovinu x, y

Po zvážení několika variant bylo rozhodnuto použít kombinace odlévání s obráběním, přesto že se jedná o velmi netradiční postup pro kusovou výrobu. Důležitým faktorem byl materiál. Dlouhodobé zatížení zvýšenými teplotami (předpokládáno 80 °C) a vyžadovaná tuhost při zachování nízké hmotnosti vedly k volbě hliníkových slitin. Možnosti výroby určily právě odlévání polotovaru. Hlavní výhodou je snížení obráběcího času. Ve většině případů by tato metoda byla z hlediska časové a finanční náročnosti velmi neefektivní.

Pro odlévání bylo nutno připravit modely. Ty byly vyrobeny metodou FDM. Následně byly zaformovány do pískové formy a po přípravě slitiny hliníku AlSi9Cu3 odlity. Výsledný polotovár byl poté odeslán na frézárnu, kde byl obroben na univerzální frézce. Proces obrábění byl poměrně rychlý, protože bylo nutné odebrat pouze přídavky na technologie výroby.



Obr. 4-5 Řez modelem pro odlitek nosiče extrudéru (červená – obrobek; žlutá – přídavek na obrábění; modrá – technologické přídavky)



Obr. 4-6 Formování modelů odlévaných součástí

4.1.3 Výpočet roviny x, y

4.1.3

Výpočet je prováděn pro dvouosý pohyb s oběma řemeny v pohybu.

Využitelná síla pro pohyb v rovině x, y

V každém okamžiku pohybu tiskové hlavy v rovině x, y je nutný synchronizovaný pohyb motorů X a Y, proto je možné využít konstantní sílu pohybu.

Použité krokové motory jsou J-4218HB2401 zapojené bipolárně.

$$M_{X,Y} = 0,46 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$d_p = 12 \text{ mm}$$

$$F_{x,y} = \frac{2 \cdot M_{X,Y}}{\frac{d_p}{2}} = \frac{2 \cdot 0,46 \text{ N} \cdot \text{m}}{\frac{(12 \cdot 10^{-3}) \text{ m}}{2}} = 153,33 \text{ N} \quad (4-1)$$

kde:

d_p	mm	je roztečný průměr řemenice
$F_{x,y}$	N	- využitelná síla od motorů
$M_{X,Y}$	N · m	- točivý moment motoru X a Y

Třecí síla lineárního vedení

$$m = 2,31 \text{ kg}$$

$$C_{\text{dyn}} = 10,9 \text{ kN} \quad (46)$$

Při zatížení vedení nižším než 10 % C_{dyn} je odpor dán převážně odporem maziva (46)

$$\mu = 0,003 \quad (47)$$

$$F_G = m \cdot g = 2,31 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 22,66 \text{ N} \quad (4-2)$$

$$F_{T_L} = F_G \cdot \mu = 22,66 \text{ N} \cdot 0,003 = 0,07 \text{ N} \quad (4-3)$$

kde:

m	kg	je hmotnost pohyblivých částí
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	- gravitační zrychlení
μ		- koeficient tření maziva
F_G	N	- tíhová síla
F_{T_L}	N	- třecí síla lineárního vedení

Výpočet třecího momentu ložiska

$$F_r = 30 \text{ N}$$

$$F_a = 0 \text{ N}$$

$$\mu = 0,0015 \quad (48)$$

$$P = F_r = 30 \text{ N}$$

$$\text{Použit zjednodušený výpočet pro } P \leq 0,1 \cdot C_{\text{dyn}} \quad (4-4)$$

$$M = 0,5 \cdot \mu \cdot P \cdot d \quad (4-5)$$

kde:

F_r	N	je radiální síla na ložisko
F_a	N	- axiální síla na ložisko
μ		- koeficient tření maziva
P	N	- ekvivalentní zatížení ložiska
M	$\text{N} \cdot \text{m}$	- třecí moment ložiska

Ložisko MF84ZZ

$$d_{b1} = 4 \text{ mm}$$

$$d_{b2} = 9 \text{ mm}$$

$$C_{\text{dyn}} = 336 \text{ N}$$

$$P \leq 0,1 \cdot C_{\text{dyn}} \quad (4-6)$$

$$M_{\text{MF}} = 0,5 \cdot \mu \cdot P \cdot d_{b1} = 0,5 \cdot 0,0015 \cdot 30 \text{ N} \cdot 4 \text{ mm} = 0,09 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (4-7)$$

$$F_{\text{T}_{\text{MF}}} = \frac{M_{\text{MF}}}{d_{b2}} = \frac{0,09 \text{ N} \cdot \text{mm}}{9 \text{ mm}} = 0,01 \text{ N} \quad (4-8)$$

kde:

d_{b1}	mm	je vnitřní průměr ložiska
d_{b2}	mm	- vnější průměr ložiska
C_{dyn}	N	- dynamická únosnost ložiska

P	N	-	ekvivalentní zatížení ložiska
M_{MF}	N · m	-	třecí moment ložiska MF84ZZ
$F_{T_{MF}}$	N	-	třecí síla ložiska MF84ZZ

Ložisko F695ZZ

$$d_{b1} = 5 \text{ mm}$$

$$d_{b2} = 10 \text{ mm}$$

$$C_{dyn} = 916 \text{ N}$$

$$P \leq 0,1 \cdot C_{dyn} \quad (4-9)$$

$$M_F = 0,5 \cdot \mu \cdot P \cdot d_{b1} = 0,5 \cdot 0,0015 \cdot 30 \text{ N} \cdot 5 \text{ mm} = 0,11 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (4-10)$$

$$F_{T_F} = \frac{M_F}{d_{b2}} = \frac{0,11 \text{ N} \cdot \text{mm}}{10 \text{ mm}} = 0,01 \text{ N} \quad (4-11)$$

kde:

d_{b1}	mm	je vnitřní průměr ložiska
d_{b2}	mm	- vnější průměr ložiska
C_{dyn}	N	- dynamická únosnost ložiska
P	N	- ekvivalentní zatížení ložiska
M_F	N · m	- třecí moment ložiska F695ZZ
F_{T_F}	N	- třecí síla ložiska F695ZZ

Síla potřebná pro pohyb tiskové hlavy

Z dopočítaných hodnot třecích sil, stanoveného maximálního zrychlení tiskové hlavy (viz 4.6.2) a účinnosti ozubeného řemene je určena síla potřebná pro pohyb v rovině x, y .

$$a_{x,y} = 6400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2} = 6,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\eta = 0,98$$

$$F = (m \cdot a_{x,y} + 4 \cdot F_{T_F} + 4 \cdot F_{T_{MF}} + 3 \cdot F_{T_L}) \cdot \eta^{-1} \quad (4-12)$$

$$F = (2,31 \text{ kg} \cdot 6,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} + 4 \cdot 0,01 \text{ N} + 4 \cdot 0,01 \text{ N} + 3 \cdot 0,07 \text{ N}) \cdot \frac{1}{0,98} = 15,38 \text{ N}$$

kde:

m	kg	je hmotnost pohyblivých částí
$a_{x,y}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	- zrychlení os x a y
F_{T_F}	N	- třecí síla ložiska F695ZZ
$F_{T_{MF}}$	N	- třecí moment ložiska MF84ZZ
M_F	N · m	- třecí moment ložiska F695ZZ
F_{T_F}	N	- třecí síla ložiska F695ZZ
F_{T_L}	N	- třecí síla lineárního vedení
η		- účinnost ozubeného řemenu
F	N	- síla potřebná pro pohyb tiskové hlavy

Bezpečnost návrhu motorů X a Y

$$k_{X,Y} = \frac{F_{x,y}}{F} = \frac{153,33 \text{ N}}{15,38 \text{ N}} = 9,97 \quad (4-13)$$

kde:

$F_{x,y}$	N	je využitelná síla od motorů
F	N	- síla potřebná pro pohyb tiskové hlavy
$k_{X,Y}$		- bezpečnost návrhu motorů X a Y

Určení předpětí řemenů

Výrobce Walther Flender udává v katalogu synchronních řemenů (49) hodnotu předpětí řemenů $(1,2 \div 1,4) \cdot F$. Je zvolena horní hranice předepsaného intervalu.

$$F_{pt} = 1,4 \cdot F = 1,4 \cdot 15,38 \text{ N} = 21,53 \text{ N} \quad (4-14)$$

kde:

F	N	je síla potřebná pro pohyb tiskové hlavy
F_{pt}	N	- síla potřebná pro předpětí řemenů

Prodloužení řemenu vlivem tahové síly

Z parametrů řemene (50) stejné konstrukce, jako použitý řemen GT2, byl určen modul pružnosti v tahu a následně dopočítáno prodloužení řemene při pohybu tiskové hlavy.

$$b_{bn} = 21 \text{ mm}$$

$$t_n = 2,5 \text{ mm}$$

$$F_N = 978 \text{ N}$$

$$\delta = 1 \text{ mm}$$

$$l_n = 1000 \text{ mm}$$

$$\sigma = \frac{F_N}{S} = \frac{F_N}{b_{bn} \cdot t_n} = \frac{978 \text{ N}}{21 \text{ mm} \cdot 2,5 \text{ mm}} = 18,63 \text{ MPa} \quad (4-15)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_n} = \frac{1 \text{ mm}}{1000 \text{ mm}} = 0,001 \quad (4-16)$$

$$E_b = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{18,63 \text{ MPa}}{0,001} = 18,63 \text{ GPa} \quad (4-17)$$

Použitý řemen GT2 má modul pružnosti v tahu 18,63 GPa.

Rozměry použitých řemenů v 3D tiskárně jsou:

$$l_b = 2690 \text{ mm}$$

$$b_b = 6 \text{ mm}$$

$$t_b = 0,63 \text{ mm}$$

$$\delta_b = \frac{F_b \cdot l_b}{2 \cdot S \cdot E_b} = \frac{F_b \cdot l_b}{2 \cdot t_b \cdot b_b \cdot E_b} \quad (4-18)$$

$$\delta_b = \frac{15,38 \text{ N} \cdot 2690 \text{ mm}}{2 \cdot 20,63 \text{ mm} \cdot 6 \text{ mm} \cdot 18,63 \cdot 10^3 \text{ MPa}} = 0,01 \text{ mm}$$

Prodloužení řemenu při použití maximálního zrychlení tiskárny je 0,01 mm.

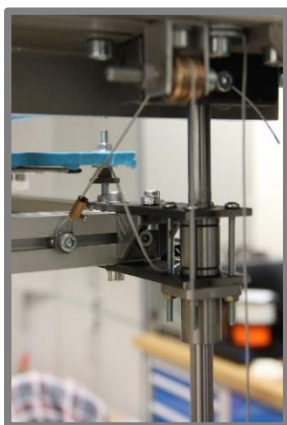
kde:

b_{bn}	mm	je šířka katalogového řemenu
t_n	mm	- tloušťka nosného profilu katalogového řemenu
F_N	N	- zatížení katalogového řemenu
δ	mm	- prodloužení katalogového řemenu
l_n	mm	- původní délka katalogového řemenu
σ	MPa	- normálové napětí katalogového řemenu
ε		- poměrné prodloužení katalogového řemenu
E_b	GPa	- modul pružnosti řemenu
F	N	- zatěžující síla použitého řemenu
l_b	mm	- délka použitého řemenu
b_b	mm	- šířka použitého řemenu
t_b	mm	- tloušťka nosného profilu použitého řemenu
δ_b	mm	- prodloužení použitého řemenu
m	kg	- hmotnost pohyblivých částí

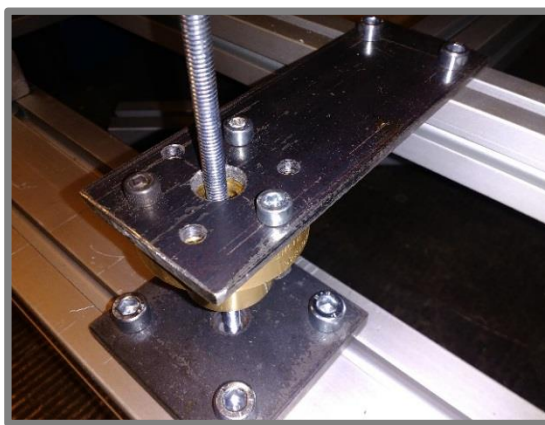
4.1.4 Osa z

4.1.4

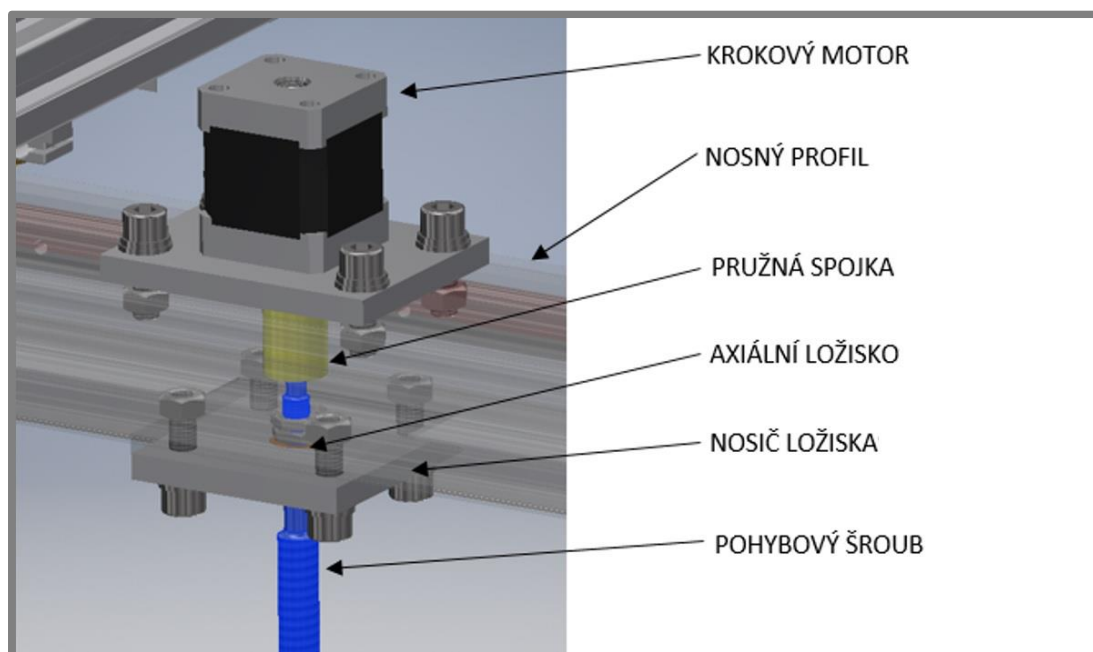
Vzhledem k rozměrům tiskárny a volby použití hliníkové desky pro tiskovou plochu, bylo nutné zajistit vhodné konstrukční uspořádání pohonu a vedení. Proto byly použity závitové tyče zavěšené, aby nedocházelo k jejich vzpěru. Zavěšení je provedeno na axiálních ložiscích (viz Obr. 4-9). Točivý moment motoru je přenášen pomocí pružné spojky. Spodní konec závitové tyče je uložen v radiálním ložisku. Točivý moment dvou krokových motorů 42HS48DS10 je přenášen na rovnoramenné trapézové šrouby Tr12x3. Ty jsou v záběru s dvěma přírubovými bronzovými maticemi, které transformují rotační pohyb pohybových šroubů na lineární pohyb tiskové plochy.



Obr. 4-7 Vedení osy z



Obr. 4-8 Výroba nosných částí osy z

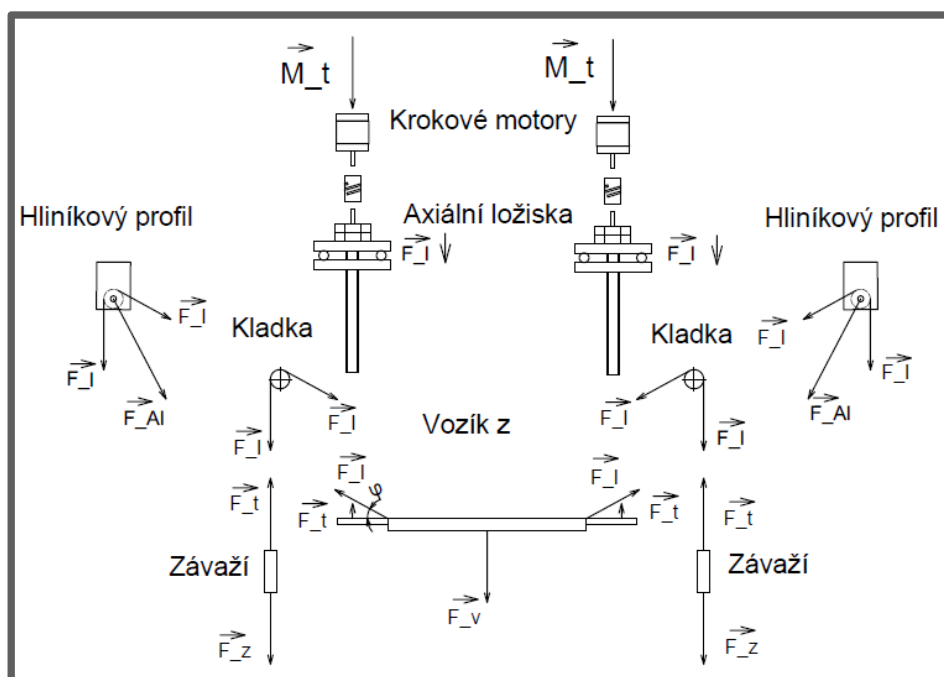


Obr. 4-9 Schéma uložení pohybového šroubu.

K zajištění pohybu tiskové podložky v jedné rovině slouží čtyři kalené vodící tyče z oceli C45 o průměru 12 mm v kombinaci se zdvojenými kuličkovými pouzdry typu LM12UU. Důvodem použití zdvojených vozíků byla nedostatečná tuhost tiskové plochy. Pro zajištění bezproblémového chodu tiskové podložky bylo použito protizávaží. S tiskovou podložkou je spojeno ocelovým lankem vedeným přes bronzovou kladku.

4.1.5 Výpočet osy z

Při zanedbání zrychlení osy z ($a_z = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) je chyba ve výpočtu nižší než 2 %. Proto je výpočet zjednodušen na statické řešení.



Obr. 4-10 Schéma silového a momentového působení pro osu z

Stanovení úhlu lana

Odvození proměnného úhlu φ následně ulehčí matematické úpravy v dalších výpočtech, kde y je svislá vzdálenost tiskové platformy od osy kladky a odpovídá i výšce pojezdu osy z .

$$y \in \langle 60; 600 \rangle \text{ mm}$$

$$x = 100 \text{ mm}$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \quad (4-19)$$

kde:

y	mm	je výška pojezdu
x	mm	- vzdálenost rámu od kladky v ose x
φ	rad	- úhel lana

Závaží

Při zanedbání zrychlení osy je zatížení závaží pouze od gravitačního zrychlení.

$$m = 5,5 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\sum \vec{F} = 0$$

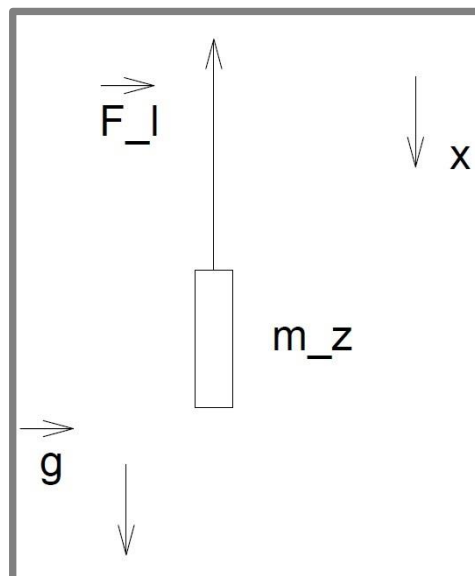
$$x: m \cdot g - F_1 = 0 \quad (4-20)$$

$$F_1 = m \cdot g = 5,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$F_1 = 53,96 \text{ N}$$

kde:

m	kg	je hmotnost pohyblivých částí
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	- gravitační zrychlení
F_1	N	- tažná síla lana



Obr. 4-11 Silový rozbor závaží

Pevnostní výpočet nosného profilu kladky

Největší zatížení profilu nesoucího kladku je v pozici, kdy je tisková podložka vysunuta do nejnižší polohy, proto $y = 600 \text{ mm}$.

$$y = 600 \text{ mm}$$

$$x = 110 \text{ mm}$$

$$F_l = 53,96 \text{ N}$$

$$t = 2 \text{ mm}$$

$$d_s = 5,8 \text{ mm}$$

$$d_p = 6 \text{ mm}$$

$$R_{p0,2_{Al}} = 120 \text{ MPa (51)}$$

$$\sum \vec{F} = 0$$

x:

$$0 = -F_{Alx} + F_l \cos \varphi \quad (4-21)$$

$$F_{Alx} = F_l \cos \varphi$$

$$F_{Alx} = F_l \cdot \cos \left(\arctg \left(\frac{y}{x} \right) \right)$$

$$F_{Alx} = F_l \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{y}{x} \right)^2 + 1}}$$

$$F_{Alx} = 53,96 \text{ N} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{600 \text{ mm}}{110 \text{ mm}} \right)^2 + 1}}$$

$$F_{Alx} = 9,73 \text{ N}$$

$$y: 0 = F_{Aly} - F_l \cdot \sin \varphi - F_l \quad (4-22)$$

$$F_{Aly} = -F_l \cdot (\sin \varphi + 1)$$

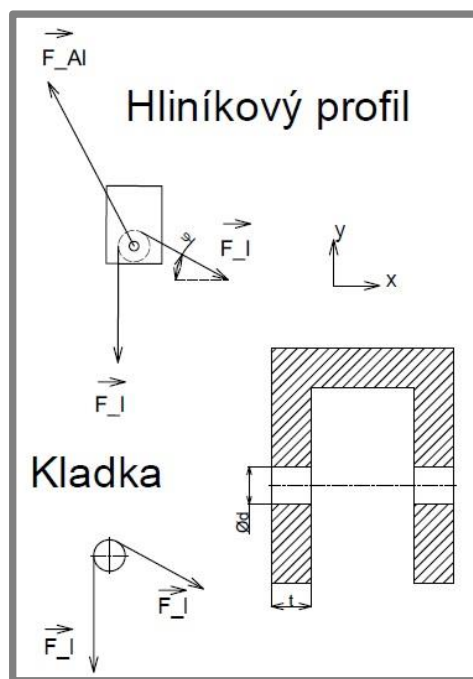
$$F_{Aly} = -F_l \cdot \left(\frac{y}{x \cdot \sqrt{\left(\frac{y}{x} \right)^2 + 1}} + 1 \right)$$

$$F_{Aly} = -53,96 \text{ N} \cdot \left(\frac{600 \text{ mm}}{110 \text{ mm} \cdot \sqrt{\left(\frac{600 \text{ mm}}{110 \text{ mm}} \right)^2 + 1}} + 1 \right) = -107,04 \text{ N}$$

$$F_{Al} = \sqrt{F_{Alx}^2 + F_{Aly}^2} \quad (4-23)$$

$$F_{Al} = \sqrt{(9,73 \text{ N})^2 + (-107,04 \text{ N})^2} = 107,48 \text{ N}$$

Výsledná síla přenesená od lana přes kladku na hliníkový profil může způsobit deformaci tělesa, proto je dopočítán tlak pomocí Hertzovy kontaktní úlohy dvou válců. Převedení na



Obr. 4-12 Silový rozbor kladky

kontakt hřídele s dírou je provedeno zadáním záporné hodnoty poloměru tolerovaného otvoru v nosné součásti. (54)(52)

$$r_e = \frac{1}{\frac{2}{d_s} + \frac{2}{-d_p}} = \frac{1}{\frac{2}{5,8 \text{ mm}} + \frac{2}{-6 \text{ mm}}} = 87 \text{ mm} \quad (4-24)$$

$$m_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} = \frac{1 - 0,3^2}{210 \text{ GPa}} = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1} \quad (4-25)$$

$$m_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} = \frac{1 - 0,3^2}{70 \text{ GPa}} = 13 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1} \quad (4-26)$$

$$E_r = \frac{1}{m_1 + m_2} = \frac{1}{4,3 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1} + 13 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}} = 57,69 \text{ GPa} \quad (4-27)$$

$$b = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{r_e}{E_r} \cdot \frac{F_{Al}}{2 \cdot t}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{87 \text{ mm}}{57,69 \text{ GPa}} \cdot \frac{107,48 \text{ N}}{2 \cdot 2 \text{ mm}}} = 0,23 \text{ mm} \quad (4-28)$$

$$p_{\max} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{F_{Al}}{2 \cdot t \cdot b} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{107,48 \text{ N}}{2 \cdot 2 \text{ mm} \cdot 0,23 \text{ mm}} = 74,37 \text{ MPa} \quad (4-29)$$

$$k_d = \frac{R_{p0,2Al}}{p_{\max}} = \frac{120 \text{ MPa}}{74,37 \text{ MPa}} = 1,61 \quad (4-30)$$

Vypočítaná bezpečnost je dostačující i proto, že případná plastická oblast je malá a zatížení by se přeneslo na větší plochu profilu.

kde:

y	mm	je výška pojezdu
x	mm	- vzdálenost rámu od kladky v ose x
F_l	N	- tažná síla lana
t	mm	- tloušťka profilu
d_s	mm	- průměr dřívku válcovaného šroubu
d_p	mm	- průměr otvoru kladky
$R_{p0,2Al}$	MPa	- mez kluzu slitiny AlMgSi _{0,5}
F_{Al}	N	- síla působící na hliníkový profil
r_e	mm	- redukovaný poloměr křivosti
m_i	MPa ⁻¹	- materiálová konstanta
E_r	GPa	- redukovaný modul pružnosti v tahu
b	mm	- poloměr kontaktní oblasti
p_{\max}	MPa	- maximální tlak
k_d		- bezpečnost vůči otlacení

Výpočet nosného lana (53)

Lano je spleteno z 18 drátů o průměru 0,35 mm z toho 7 lanek tvoří duši a zbylých 11 lanek je vinuto protisměrně vůči duši v jedné vrstvě.

$$F_l = 53,96 \text{ N}$$

$$n_w = 18$$

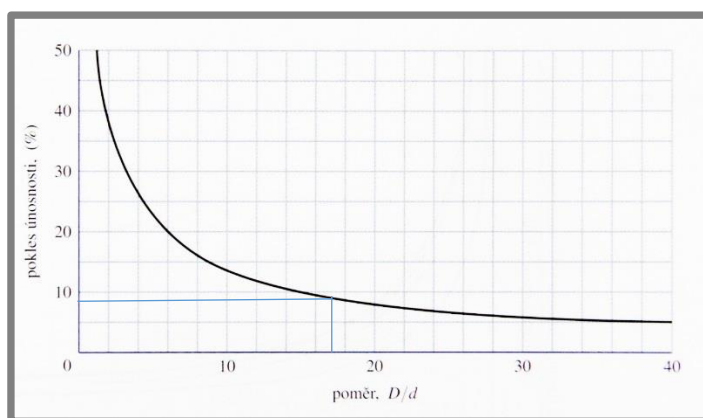
$$E_l = 150 \cdot 10^3 \text{ MPa} \quad (54)$$

$$d_w = 0,35 \text{ mm}$$

$$D = 20 \text{ mm}$$

$$d_r = 1,2 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\max} = E_l \frac{d_w}{D} = 150 \cdot 10^3 \text{ MPa} \frac{0,35 \text{ mm}}{20 \text{ mm}} = 2625 \text{ MPa} \quad (4-31)$$



Graf 4-1 Závislost procentuálního snížení jmenovité únosnosti lana v důsledku ohybu lana kolem kladky či bubnu na poměru D/d (55)

$$\frac{D}{d} = \frac{20 \text{ mm}}{1,2 \text{ mm}} = 16,67 \rightarrow l = 8 \% \quad (4-32)$$

$$F_{\min} = \sigma_{\max} \cdot S = \sigma_{\max} \cdot n_w \cdot \frac{\pi \cdot d_w^2}{4} \cdot (1 - l) \quad (4-33)$$

$$F_{\min} = 2625 \text{ MPa} \cdot 18 \cdot \frac{\pi \cdot (0,35 \text{ mm})^2}{4} \cdot (1 - 8 \%) = 4182,30 \text{ N}$$

$$k_l = \frac{F_{\min}}{\frac{F_l}{2}} = \frac{4182,30 \text{ N}}{\frac{53,96 \text{ N}}{2}} = 155,01 \quad (4-34)$$

kde:

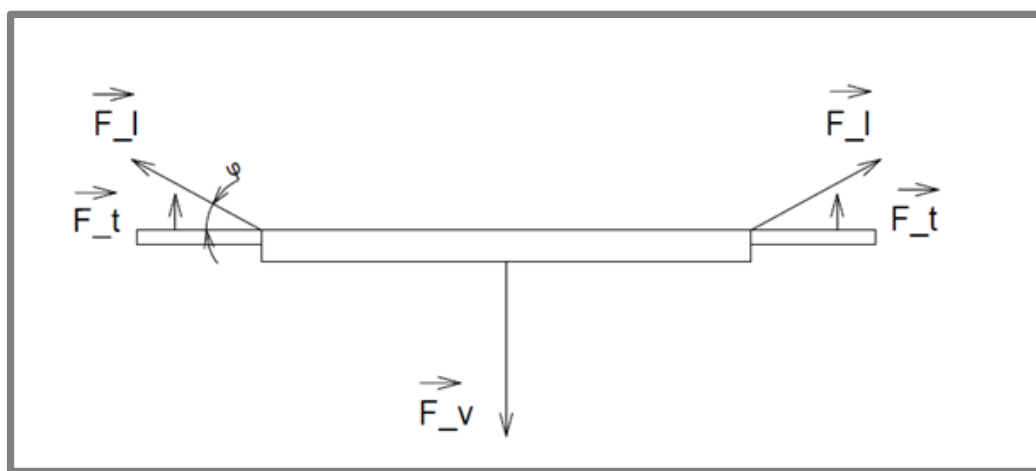
F_l	N	je tažná síla lana
n_w		- počet drátů lana
E_l	MPa	- modul pružnosti lana v tahu

d_w	mm	-	průměr drátu lana
D	mm	-	průměr kladky
d_r	mm	-	průměr lana
l	%	-	procentuální snížení únosnosti lana
F_{\min}	N	-	minimální síla lana do přetržení
k_1		-	bezpečnost lana vůči přetržení

Z důvodu neznámých křivek životnosti daného lana nebyla životnost počítána. S ohledem k součiniteli bezpečnosti lana a použití jedné kladky se dá předpokládat, že lano nebude vykazovat únavové porušení.

Výpočet síly působící na matici pohybového šroubu

Na začátku tisku je vlivem úhlu φ největší zatížení pohybového šroubu, proto následující výpočty budou vyhodnoceny pro $y = 60$ mm.



Obr. 4-13 Schéma silového působení na tiskovou podložku

$$y = 60 \text{ mm}$$

$$x = 110 \text{ mm}$$

$$F_l = 53,96 \text{ N}$$

$$F_v = 140 \text{ N}$$

$$\sum \vec{F} = 0$$

$$x: 0 = -F_l \cos \varphi + F_t \cos \varphi \quad (4-35)$$

$$0 = 0$$

$$y: 0 = 2 \cdot F_t + F_l \cdot \sin \varphi - F_v \quad (4-36)$$

$$F_t = \frac{F_v}{2} - F_l \cdot \sin \varphi$$

$$F_t = \frac{F_v}{2} - F_l \cdot \frac{y}{x \cdot \sqrt{\left(\frac{y}{x}\right)^2 + 1}} = \frac{140 \text{ N}}{2} - 53,96 \text{ N} \cdot \frac{60 \text{ mm}}{110 \text{ mm} \cdot \sqrt{\left(\frac{60 \text{ mm}}{110 \text{ mm}}\right)^2 + 1}}$$

$$F_t = 44,16 \text{ N}$$

kde:

y	mm	je výška pojezdu
x	mm	- vzdálenost rámu od kladky v ose x
F_l	N	- tažná síla lana
F_v	N	- tíhová síla vozíku
F_t	N	- síla působící na matici

Výpočet samosvornosti závitu matice (56)

Výpočet potřebný pro nastavení tiskárny, kde je možné vypnout motory jednotlivých os tak, aby nedocházelo k odběru proudu, pokud není tiskárna v procesu tisku.

Dáno:

$$f = 0,23 \quad (56)$$

$$d_2 = 10,5 \text{ mm} \quad (57)$$

$$P_h = 3 \text{ mm}$$

$$f_m = \operatorname{tg} \left(\frac{P_h}{\pi \cdot d_2} \right) \cdot \cos \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (4-37)$$

$$f_m = \operatorname{tg} \left(\frac{3 \text{ mm}}{\pi \cdot 10,5 \text{ mm}} \right) \cdot \cos \left(\frac{30^\circ \cdot \pi}{2 \cdot 180^\circ} \right) = 0,09$$

$$f > f_m \dots \text{zajištěna samosvornost}$$

kde:

f		je koeficient tření ocel – bronz
d_2	mm	- střední průměr závitu matice
P_h	mm	- stoupání závitu
f_m		- koeficient tření matice

Výpočet životnosti axiálního ložiska (58)

Jedná se o dvě drobná axiální ložiska typu F8-16M, která přenáší hmotnost celé tiskové plochy.

$$L_{10} = 10^6$$

$$C_{\text{dyn}} = 3920 \text{ N} \quad (59)$$

$$a = 3$$

$$F_t = 44,16 \text{ N}$$

$$v_{z \text{ max}} = 3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$P_h = 3 \text{ mm}$$

$$n_D = \frac{v_{z \max}}{P_h} = \frac{3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}}{3 \text{ mm}} = 1 \text{ s}^{-1} = 60 \text{ min}^{-1} \quad (4-38)$$

$$L_D = \left(\frac{C_{\text{dyn}}}{F_t} \right)^a \cdot \frac{L_{10}}{n_D \cdot 60} = \left(\frac{3920 \text{ N}}{44,16 \text{ N}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \text{ min}^{-1} \cdot 60} \quad (4-39)$$

$$L_D = 194,30 \cdot 10^6 \text{ hod}^{-1}$$

kde:

L_{10}		je základní výpočtová trvanlivost
C_{dyn}	N	- základní dynamická únosnost ložiska
a		- exponent lineární regrese zatížení
F_t	N	- síla působící na matici
$v_{z \max}$	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	- maximální rychlost v ose z
P_h	mm	- stoupání závitu
n_D	min^{-1}	- maximální otáčky šroubu
L_D	hod	- základní trvanlivost ložiska

Výpočet momentu krokových motorů bez použití protizávaží (60)

$$F_v = 140 \text{ N}$$

$$d_2 = 10,5 \text{ mm}$$

$$P_h = 3 \text{ mm}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$M_{zv0} = \frac{F_v \cdot d_2}{2} \cdot \frac{P_h \cdot \cos \frac{\alpha}{2} + \pi \cdot f \cdot d_2}{\pi \cdot d_2 \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - f \cdot P_h} \quad (4-40)$$

$$M_{zv0} = \frac{140 \text{ N} \cdot 10,5 \text{ mm}}{2} \cdot \frac{3 \text{ mm} \cdot \cos \frac{30^\circ}{2} + \pi \cdot 0,23 \cdot 10,5 \text{ mm}}{\pi \cdot 10,5 \text{ mm} \cdot \cos \frac{30^\circ}{2} - 0,23 \cdot 3 \text{ mm}} = 247,21 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Použitý krokový motor 42HS48DS10

$$M_m = 480 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$k_m = \frac{M_m}{M_{zv0}} = \frac{480 \text{ N} \cdot \text{mm}}{247,21 \text{ N} \cdot \text{mm}} = 1,94 \quad (4-41)$$

kde:

F_v	N	je tíhová síla vozíku
d_2	mm	- střední průměr závitu matice
P_h	mm	- stoupání závitu
α	°	- vrcholový úhel závitu
M_{zv0}	$\text{N} \cdot \text{mm}$	- moment potřebný pro pohyb vozíku bez závaží
M_m	$\text{N} \cdot \text{mm}$	- točivý moment motorů
k_m		- koeficient bezpečnosti pro pohyb vozíku

Při provozu bylo shledáno, že bezpečnost návrhu nevyhovuje. Následně byla přijata opatření v podobě použití protizávaží.

Výpočet momentu krokových motorů s použitým protizávažím (60)

$$F_t = 44,16 \text{ N}$$

$$d_2 = 10,5 \text{ mm (61)}$$

$$P_h = 3 \text{ mm}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$M_{zv} = \frac{F_t \cdot d_2}{2} \cdot \frac{P_h \cdot \cos \frac{\alpha}{2} + \pi \cdot f \cdot d_2}{\pi \cdot d_2 \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - f \cdot P_h} \quad (4-42)$$

$$M_{zv} = \frac{44,16 \text{ N} \cdot 10,5 \text{ mm}}{2} \cdot \frac{3 \text{ mm} \cdot \cos \frac{30^\circ}{2} + \pi \cdot 0,23 \cdot 10,5 \text{ mm}}{\pi \cdot 10,5 \text{ mm} \cdot \cos \frac{30^\circ}{2} - 0,23 \cdot 3 \text{ mm}} = 77,98 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$k_m = \frac{M_m}{M_{zv}} = \frac{480 \text{ N} \cdot \text{mm}}{77,98 \text{ N} \cdot \text{mm}} = 6,16 \quad (4-43)$$

kde:

F_t	N	je síla působící na matici
d_2	mm	- střední průměr závitu matice
P_h	mm	- stoupání závitu
α	°	- vrcholový úhel závitu
M_{zv}	N · mm	- moment potřebný pro pohyb vozíku
M_m	N · mm	- točivý moment motorů
k_m		- koeficient bezpečnosti pro pohyb vozíku

Stávající bezpečnost návrhu s protizávažím je dostačující.

Pevnostní kontrola pohybového šroubu k meznímu stavu pružnosti

$$d_3 = 8 \text{ mm (61)}$$

$$R_{p0,2} = 300 \text{ MPa (62)}$$

$$M_{zv} = 77,98 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$F_t = 44,16 \text{ N}$$

$$\tau_1 = \frac{16 \cdot M_{zv}}{\pi \cdot d_3^3} = \frac{16 \cdot 77,98 \text{ N} \cdot \text{mm}}{\pi \cdot (8 \text{ mm})^3} = 0,78 \text{ MPa} \quad (4-44)$$

$$\sigma_1 = \frac{4 \cdot F_t}{\pi \cdot d_3^3} = \frac{4 \cdot 44,16 \text{ N}}{\pi \cdot (8 \text{ mm})^2} = 0,88 \text{ MPa} \quad (4-45)$$

Využita Trescova podmínka plasticity τ_{max}

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + 4 \cdot \tau_1^2} = \sqrt{(0,88 \text{ MPa})^2 + 4 \cdot (0,78 \text{ MPa})^2} \quad (4-46)$$

$$\sigma_{red} = 1,79 \text{ MPa}$$

$$k_k = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{red}} = \frac{300 \text{ MPa}}{1,79 \text{ MPa}} = 167,60 \quad (4-47)$$

kde:

d_3	mm	je malý průměr závitu matice
$R_{p0,2}$	MPa	- mez kluzu trapézového šroubu
M_{zv}	Nmm	- moment potřebný pro pohyb vozíku
F_t	N	- síla působící na matici
τ_1	MPa	- smykové napětí
σ_1	MPa	- normálové napětí
σ_{red}	MPa	- redukované napětí
k_k		- koeficient bezpečnosti vůči meznímu stavu pružnosti

Kontrola matice na otlačení

$$F_t = 44,16 \text{ N}$$

$$d_2 = 10,5 \text{ mm}$$

$$L_n = 30 \text{ mm}$$

$$p_d = 20 \text{ MPa} \quad (62)$$

$$p_n = \frac{2 \cdot F_t}{\pi \cdot d_2 \cdot L_n} = \frac{2 \cdot 44,16 \text{ N}}{\pi \cdot 10,5 \text{ mm} \cdot 30 \text{ mm}} = 0,09 \text{ MPa} \quad (4-48)$$

$$k_p = \frac{p_d}{p_n} = \frac{20 \text{ MPa}}{0,09 \text{ MPa}} = 222,22 \quad (4-49)$$

kde:

F_t	N	je síla působící na matici
d_2	mm	- střední průměr závitu matice
L_n	mm	- délka matice
p_d	MPa	- dovolený tlak v matici
p_n	MPa	- působící tlak v matici
k_p		- koeficient bezpečnosti vůči otlačení

4.1.6 Stůl tiskové podložky

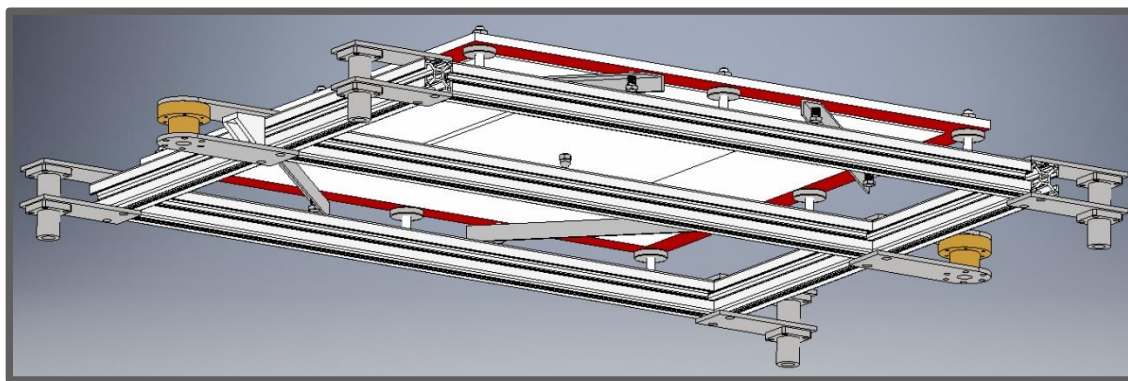
4.1.6

Při koncepčním návrhu bylo rozhodnuto požit tiskovou desku z hliníkové slitiny. Rozměr desky byl dán minimálním tiskovým prostorem tiskárny. Tloušťka desky už dána nebyla, proto byla

zvolena s ohledem na zachování dobré tuhosti a s přihlédnutím ke hmotnosti celého pohyblivého stolu. Výsledný rozměr byl (560 x 560 x 8) mm.

Vytápění podložky bylo řešeno slídovou deskou. Z důvodu snížení finančních nákladů bylo rozhodnuto o použití topné desky bez konstrukčních zásahů, jako je například lineární pole otvorů pro připevnění desky. Pro dosažení těsného kontaktu mezi topnou deskou a tiskovou podložkou bylo rozhodnuto o slepení těchto součástí teplo vodivým lepidlem. Deformace tiskové podložky vlivem rozdílného teplotního součinitele délkové roztažnosti způsobila nemožnost vyrovnat podložku po ohřátí tělesa (viz rovnice (4-50)). Proto bylo přikročeno k jinému řešení. Byl využit opěrný člen a přidány přitlačné profily pro zajištění těsného kontaktu topné desky s tiskovou podložkou. Opěrný člen uložený na kulovém kloubu byl použit pro nastavení roviny pomocí stavících šroubů bez deformace tiskové podložky.

Celá vyhřívaná deska je uchycena na nosném rámu z hliníkových profilů (30 x 30) mm od firmy Alutec KK. Komponenty pro uchycení trapézových matic a kuličkových pouzder byly vyrobeny z ocelových pásovin tloušťky 4 mm.



Obr. 4-14 Sestava stiskového stolu

Rozdíl prodloužení teplotně zatížených desek

$$l_t = 500 \text{ mm}$$

$$\alpha_{Fe} = 1,20 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \quad (63)$$

$$\alpha_{Al} = 2,38 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \quad (63)$$

$$\Delta T = 80 \text{ K}$$

$$\Delta l = (\alpha_{Al} - \alpha_{Fe}) \cdot l_t \cdot \Delta T \quad (4-50)$$

$$\Delta l = (2,38 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} - 1,20 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}) \cdot 500 \text{ mm} \cdot 80 \text{ K} = 0,472 \text{ mm}$$

kde:

l_t	mm	je styčná délka desek
α_{Fe}	K ⁻¹	- teplotní součinitel délkové roztažnosti oceli
α_{Al}	K ⁻¹	- teplotní součinitel délkové roztažnosti hliníku
ΔT	K	- teplotní rozdíl
Δl	mm	- délkový rozdíl

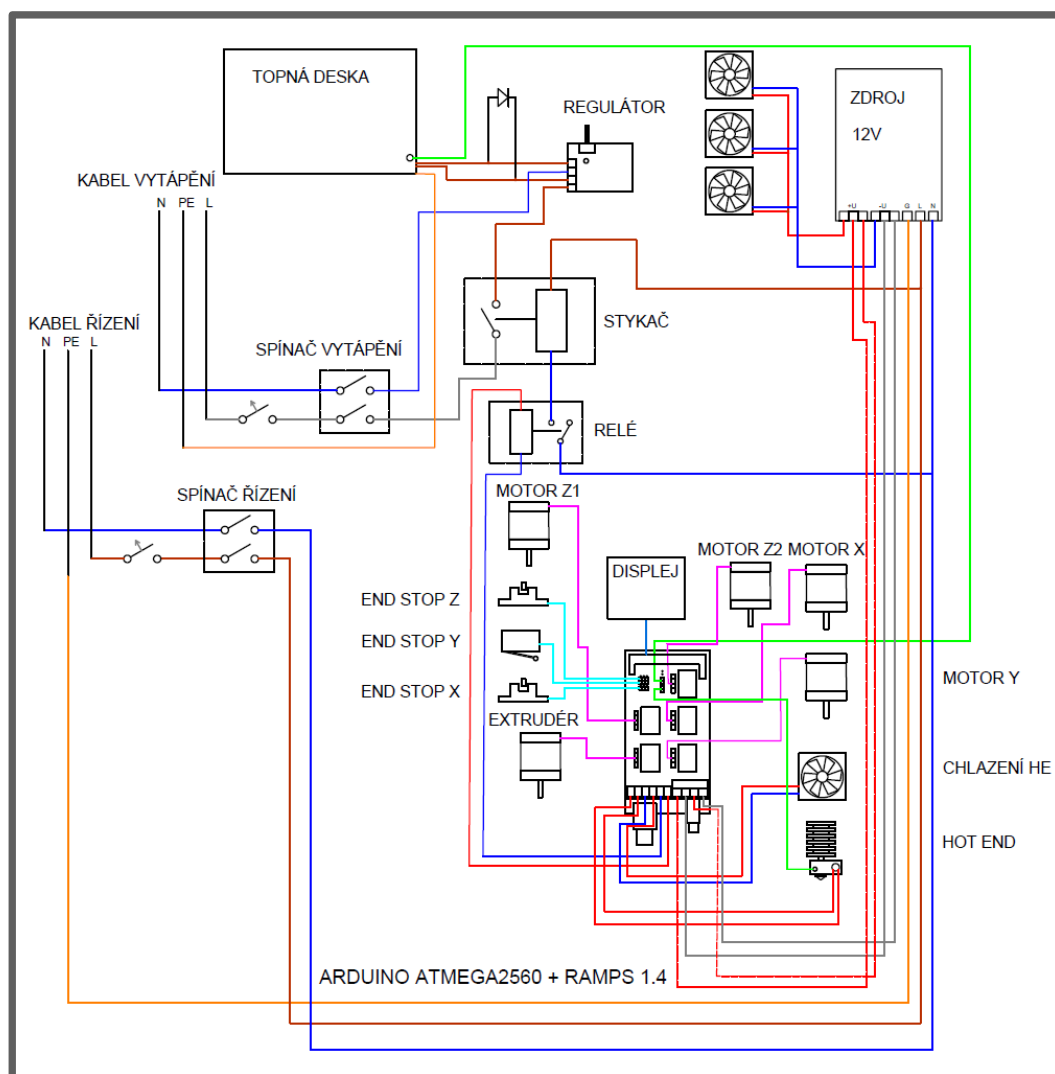
Tento rozdíl délek jednotlivých desek není zanedbatelný a způsobí deformaci tiskové plochy.

4.2 Zapojení elektroniky

Zapojení elektroniky bylo přizpůsobeno nárokům konstrukce. Bylo nutno napájet topnou desku střídavým proudem o napětí 230 V a zajistit aktivní chlazení krabic s elektronikou. Dále rozmístit přívody kabelů k řídicí desce a vyřešit nutnost napájení motorů pro osu z vyššími proudy k zajištění dostatečného točivého momentu.

Elektronika je umístěna ve dvou krabicích. Ve spodní z nich jsou spínače tiskárny, kombinace relé se stykačem pro spínání topné desky, triakový regulátor výkonu desky, jističe a zdroj stejnosměrného proudu o napětí 12 V. Z něj jsou vyvedena jednotlivá napětí do druhé krabice, kde je řídicí elektronika Arduino ATmega2560 s deskou Ramps. Na této desce jsou řadiče motorů A4988 a jednotlivé vývody pro prvky tiskárny. Deska Ramps je také osazena plně grafickým LCD displejem se slotem pro SD karty. Konstrukce tiskárny využívá tři koncové spínače pro zjištění počáteční polohy, dvě teplotní čidla – termistory (tisková hlava, podložka) a 5 krokových motorů (2 motory osy z, motor osy x a y, extruder).

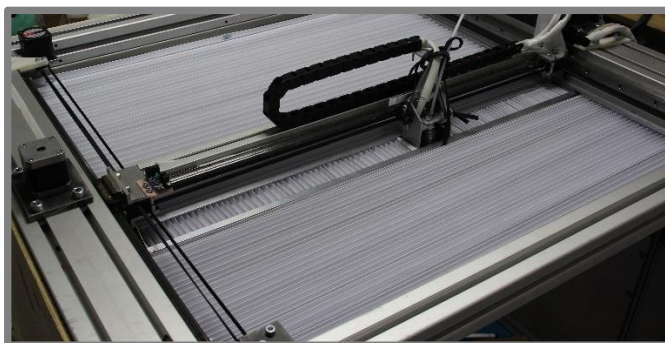
V tiskárně bylo využito již dříve použitých elektronických komponentů.



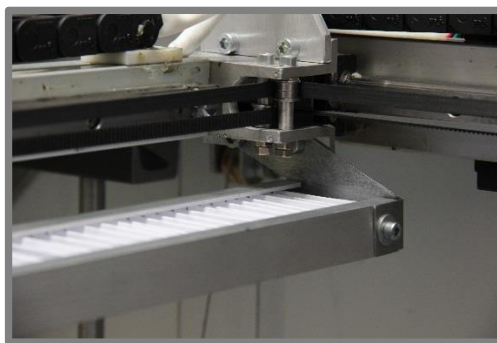
Obr. 4-15 Schéma zapojení elektroniky tiskárny

4.3 Měchový systém

Návrh měchového systému spočíval ve dvojicích měchů, které umožňují pohyb v jedné z požadovaných os. Pro vedení měchů jsou použity U profily z hliníkové slitiny. K uchycení profilů slouží ohýbané součásti z tenkých ocelových plechů. V původním návrhu bylo počítáno s uchycením konců měchů pomocí magnetických pásů, které by umožnily rychlou demontáž. Od toho řešení bylo ustoupeno. Důvodem byla nedostatečná síla cenově dostupných magnetů. Konečným řešením bylo použití šroubů. Pole měchu u přední části tiskárny je odnímatelné pro zajištění snadné kalibrace tiskové plochy.



Obr. 4-16 Krycí měchy



Obr. 4-17 Uchycení měchů osy x

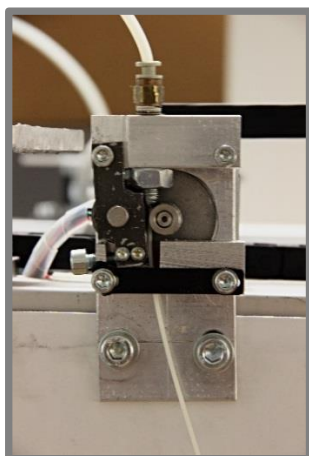


Obr. 4-18 Uchycení měchů na tiskové hlavě

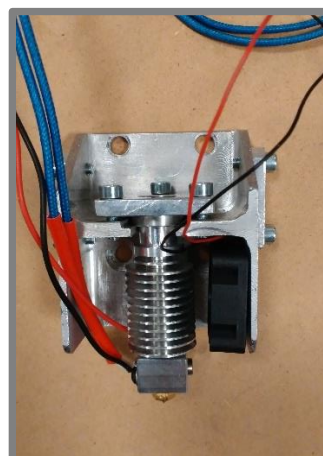
4.4 Extrudér

Podavač filamentu

Při návrhu tiskárny bylo počítáno s použitím podavače filamentu z tiskárny uzpůsobené pro stavbu modelů z 3mm vlákna. Pro kompatibilitu s průměrem vlákna 1,75 mm bylo nutné vyměnit spojku držící vodící teflonovou trubičku. Při kalibraci tiskárny bylo zjištěno, že teflonová trubička v prostoru mezi spojovacím elementem a rádlovacím kolečkem nemá dostatečnou tuhost a vlákno vlivem tlakového napětí ztratí vzpěrnou stabilitu. Do tohoto prostoru musel být vyroben prvek, který stabilizuje trubičku (viz Obr. 4-19).



Obr. 4-19 Modifikovaný extrudér



Obr. 4-20 Instalace hot endu

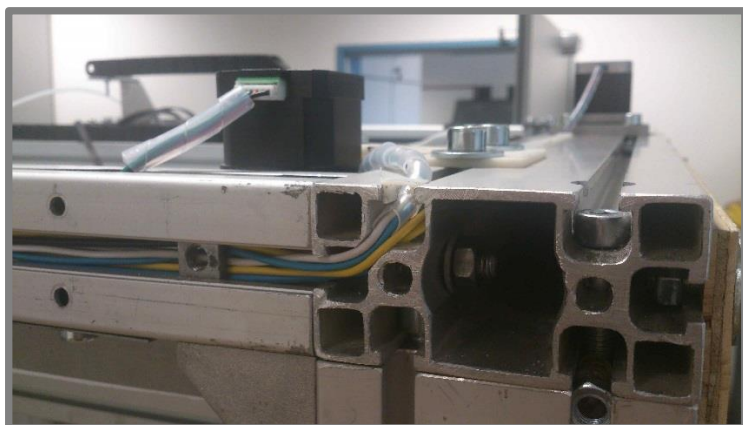
Hot end

Byl zakoupen hot end s označením E3D V6 uzpůsobený pro průměr filamentu 1,75 mm s použitou tryskou o vnitřním průměru 0,6 mm. Jedná se o celokovovou konstrukci se zavedenou teflonovou trubičkou. Při zkušebních tiscích bylo nahřáto těleso na teplotu 280 °C. Při této teplotě, ačkoliv výrobce předepisuje vhodnost až do 290 °C, došlo ke spálení ochranného opletu termistoru a následnému zničení tohoto senzoru teploty. Proto byl originální termistor ATC Semitec 104GT-2 nahrazen termistorem EPCOS 100k. Pro následné zahřívání byla teplota omezena ve firmware na 270 °C.

4.5 Kabeláž

4.5

Vedení kabelů tiskárny bylo u statických prvků řešeno využitím drážek stavebních profilů rámu, které jsou kryty vytisknutými lištami. Pro pohyblivé prvky bylo vybíráno mezi užitím opletů z nylonových vláken, nebo užitím energetických řetězů. Kabel tvořený polyamidovými vlákny nebyl použit z důvodu nízké tuhosti svazku s elektrickými kabely. Energetický řetěz byl zvolen o rozměrech (10 x 15) mm s minimálním poloměrem ohybu R48 mm. Pro úseky spojující energetické kabely s dalšími částmi bylo užito silikonových bužirek. Pro krytování kabelů statických prvků byly užity bužírky řezané.



Obr. 4-21 Vedení kabelů v profilové drážce



Obr. 4-22 Energetický kabel

4.6 Kalibrace tiskárny

Seřízení tiskárny bylo nezbytné pro zajištění spolehlivosti a přesnosti tisku.

4.6.1 Kalibrace motorů

Před zkušebním tiskem byla provedena kalibrace krokových motorů. Pro každý motor byl kalkulován počet kroků na milimetr a následně byla prováděna korekce výsledků.

Motor y roviny x, y

Vzorec pro výpočet kroků s řemenovým převodem je odvozen z geometrie, charakteristik motoru a řemenice.

$$Y_s = X_s = \frac{s_m \cdot s_d}{p \cdot z} = \frac{200 \text{ kr.} \cdot 16}{2,5 \text{ mm} \cdot 21} = 80 \text{ kr./mm} \quad (4-51)$$

kde:

X_s	kr./mm	je počet kroků motoru X na mm
Y_s	kr./mm	- počet kroků motoru Y na mm
s_m	kr.	- počet základních kroků motoru na otáčku
s_d		- mikrokrokování řadiče motoru
p	mm	- rozteč zubů řemenu
z		- počet zubů řemenice

Po experimentálním vyhodnocení byla hodnota počtu kroků rovna

$$Y_s = X_s = 80,26 \text{ kr./mm}.$$

Motor y osy z

Osa z je osazena trapézovými šrouby. Proto rovnice (4-51) se upraví do tvaru:

$$Z_s = \frac{s_m \cdot s_d}{P_h} = \frac{200 \text{ kr.} \cdot 16}{3 \text{ mm}} = 1066,67 \text{ kr./mm} \quad (4-52)$$

kde:

Z_s	kr./mm	je počet kroků motorů Z na mm
s_m	kr.	- počet základních kroků motoru na otáčku
s_d		- mikrokrokování řadiče motoru
P_h	mm	- stoupání závitu

Při ověřování výsledků byly naměřeny totožné vzdálenosti, proto nebylo nutné tento parametr dále upravovat.

Pohon extruderu

Následná kalibrace probíhala již více experimentálně. Odvalování rádlovacího kolečka po vlákně sice probíhá synchronně, avšak velikost přitlačné síly extruderu ovlivňuje poloměr, na kterém se vlákno odvaluje. Přesto byla nejprve dopočítána hodnota kroků na mm pro daný motor. Opět se jedná o upravenou rovnici (4-51), kde je ve jmenovateli vyjádřen obvod, po kterém se vlákno odvaluje.

$$E_s = \frac{s_m \cdot s_d}{\pi \cdot d_k} = \frac{200 \text{ kr.} \cdot 32}{\pi \cdot 8 \text{ mm}} = 254,65 \text{ kr./mm} \quad (4-53)$$

Posléze se iterační metodou dospělo k požadované hodnotě.

$$E_{s,i+1} = \frac{l_p}{l_s} E_{s,i} \quad (4-54)$$

kde:

$E_{s,i}$	kr./mm	je počet kroků motoru extrudéru na mm
s_m	kr.	- počet základních kroků motoru na otáčku
s_d		- mikrokrokování řadiče motoru
d_k	mm	- malý průměr podávacího kola
l_p	mm	- požadovaná vzdálenost
l_s	mm	- skutečná vzdálenost

Tab. 4-1 Iterační přiblížení skutečné hodnoty počtu kroků na otáčku

Přiblížení	1.	2.	3.
Počet kroků na mm (kr./mm)	254,65	236,9	241,73
Skutečná vzdálenost (mm)	322	294	300

Po kalibraci posuvu filamentu byla výsledná hodnota $E_s = 241,73 \text{ kr./mm}$.

4.6.2 Nastavení kinematických veličin

4.6.2

Nastavované veličiny jsou ryv, zrychlení a tisková rychlost. Důvodem pro optimální nastavení těchto parametrů je zkrácení doby tisku a zajištění spolehlivosti a přesnosti pohonů.

Upravování parametrů probíhalo pouze pro tiskovou rovinu x, y . Důvodem je zanedbatelný vliv osy z na dobu tisku.

Zápis parametrů probíhal formou vypisování G-kódu. Příklad postupu při stanovení maximálního zrychlení je znázorněn v tabulce níže (Tab. 4-2).

Tab. 4-2 Kalibrační G-kód

M205 X20 Y20 Z0.4 E5	// nastavení hodnot ryvu
M500	// uložení do paměti EEPROM
M203 X3000 Y3000	// [mm * min ⁻¹] // snížení rychlostí os x, y $v_{x,y} = 50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
M500	
M201 X3000 Y3000	// nastavení výchozího zrychlení os x, y // $a_{x,y} = 3000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$
M500	
G92	// absolutní souřadnicový systém
G28 X Y	// najetí do nulové polohy
G1 X500 Y500 F3000	// pohyb tiskové hlavy po diagonálách
G1 X0 Y0 F3000	

G1 X500 Y0 F3000	
G1 X0 Y500 F3000	
M201 X3400 Y4300	// zvýšení zrychlení os x, y // $a_{x,y} = 3400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$
M500	
	// opakování pohybu tiskové hlavy

Ryv

Ryv je časová derivace zrychlení a projevuje se zejména v okamžiku rozjezdu, či zastavení pohonu. Tento okamžik je zanedbatelný v porovnání s dobou plynulého zrychlení tiskové hlavy, proto se tato hodnota netestovala a byla nastavena na hodnotu $j_{x,y} = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-3}$ pro pohyb v rovině x, y, $j_z = 0,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-3}$ pro osu z a $j_e = 5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-3}$ pro pohon extrudéru.

Zrychlení

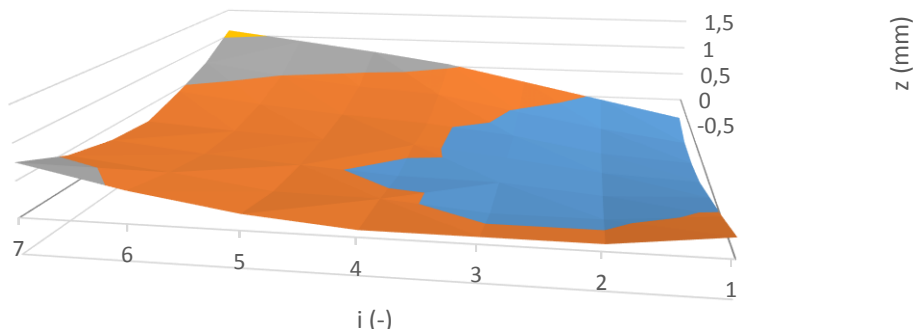
Hodnoty zrychlení mají hlavní vliv na dobu tisku u tvarově složitých součástí. Testovací pohyby byly zejména v diagonálním směru. Důvodem je, že při těchto pohybech je celý pohyb závislý na jednom z motorů, přičemž druhý je v klidu. Při nastavování parametru zrychlení se nejprve snížily rychlosti tiskové hlavy na $v_{x,y} = 50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a bylo nastaveno zrychlení na výchozí hodnotu $a_{x,y} = 3000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$. Postupným navyšováním parametru zrychlení se dospělo k hodnotě $a_{\text{max},x,y} = 8000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$. Konečná hodnota byla snížena na 80 % pro zajištění spolehlivosti, tedy $a_{x,y} = 6400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$. Hodnota pro osu z činí $a_z = 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ a pro krokový motor extrudéru $a_e = 10000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$.

Rychlosti

Při samotném tisku je rozlišováno mezi několika druhy rychlostí. Jedná se o rychlost posuvovou, tiskovou rychlost vnějších vrstev, vnitřních vrstev, výplní, tiskovou rychlost mostů apod. Nastavení těchto rychlostí probíhá obvykle ve sliceru, avšak vždy se vychází z maximální možné rychlosti, které je tiskárna schopna dosáhnout. Z tohoto vyplývá, že nastavování vysokých tiskových rychlostí nemá význam, protože specifické části modelu vyžadují rozdílné a většinou nižší tiskové rychlosti. Přesto byla zjištěna hraniční rychlost posuvů. Tato hodnota byla stanovena tentokrát při zrychlení zjištěném v předchozím kroku. Postupným zvyšováním výchozí hodnoty $v_{x,y} = 50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ bylo dospěno k hraniční hodnotě $v_{\text{max},x,y} = 170 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Konečná hodnota opět snížena na 80 %, tedy $v_{\text{max},x,y} = 136 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

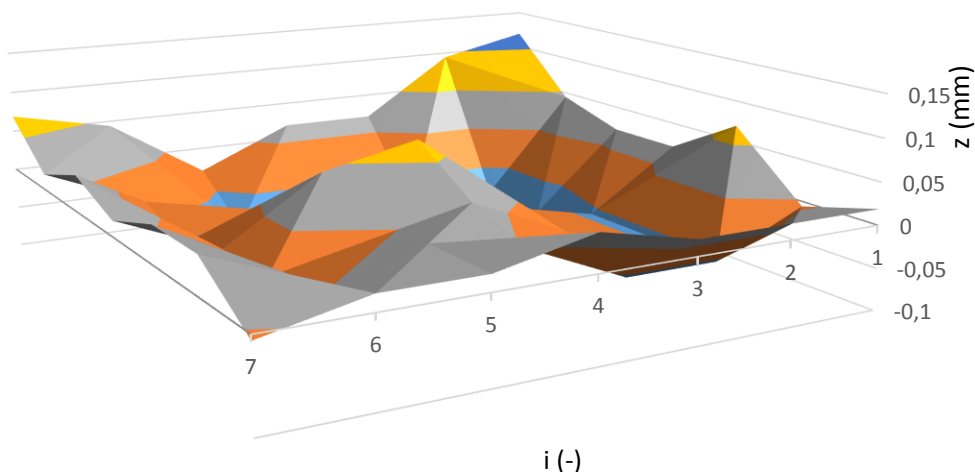
4.6.3 Kalibrace tiskové podložky

Při kalibraci bylo využito kalibračního cyklu, který zaznamenával rozměry na poli 7 x 7 bodů. Případné rozdíly byly nejprve korigovány pomocí stavěcích šroubů. Po mechanickém nastavení byl cyklus aplikován podruhé. Tentokrát naměřené úchytky byly zaznamenány do paměti tiskárny, kde hodnoty byly proloženy křivkou. Ta je aplikována při každém tisku, aby byla dodržena konstantní vzdálenost tiskové hlavy od podložky.

Tisková plocha před kalibrací

Graf 4-2 Znázornění povrchu tiskové plochy před kalibrací

Z grafu níže uvedeného (Graf 4-3) je patrný zásah kalibračních šroubů. Oproti stavu před kalibrací, znázorněném v grafu výše (Graf 4-2), jsou odchylky tiskové plochy 10x menší. Rovinnost plochy je 0,2 mm. Tento stav je dostačující při použití programového rovnání podložky.

Tisková plocha po kalibraci

Graf 4-3 Znázornění povrchu tiskové podložky po mechanické kalibraci

4.6.4 Ladění tiskových parametrů

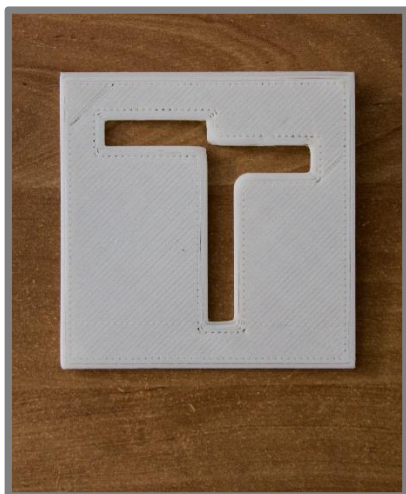
4.6.4

Byla vytvořena 3 kalibrační tělesa pro zajištění vhodného nastavení tiskárny.

První těleso byl kvádr s logem VUT s vnějšími rozměry (100 x 100 x 10) mm. Úkolem tohoto tělesa bylo zjištění rozměrové přesnosti, protože na menších tvarech může být měřený rozměr ovlivněn nejen tiskovými parametry, ale následnou chybou měření. Dalším sledovaným místem byly ostré přechody tělesa, kde je potřeba zajistit dobrou přilnavost k podložce. Výplň byla zvolena čárová s nastavením vysokých tiskových parametrů, kde byly ověřeny nastavené kinematické veličiny.

Zde se ukázalo zrychlení os x a y příliš vysoké, protože při tisku s vysokými tiskovými rychlostmi docházelo k posunu vrstev. Následným snížením na $a_{x,y} = 5000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ byl

tento jev eliminován. Výsledné rozměry validačního tisku byly (100,0 x 99,6 x 9,8) mm. Rozdílné rozměry v jednotlivých osách ukazují na možnost opětovné kalibrace krokování motorů X a Y.

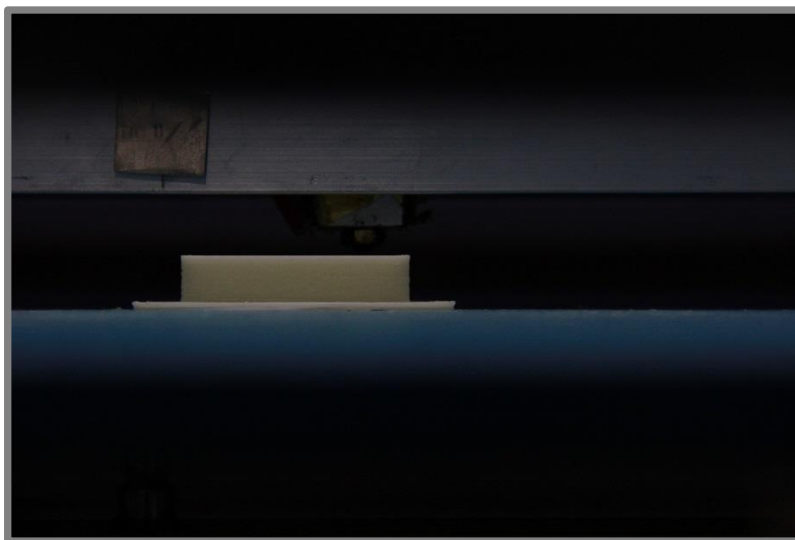


Obr. 4-23 Hotový tisk s nedostatečnou extruzí materiálu

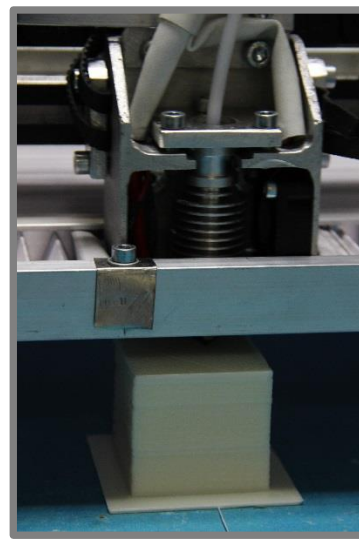


Obr. 4-24 Zkalibrovaná extruze materiálu

Následujícím tělesem byla kalibrační krychle. Ta sloužila ke zjištění rozměrové přesnosti ve směru osy z a chování tiskárny při pokládání vrchních vrstev modelu. Délka hrany krychle byla 40 mm.



Obr. 4-25 Průběh tisku kalibrační kostky



Obr. 4-26 Tisk bez krycích měchů

V průběhu testování došlo ke změně výrobce materiálu, což se projevilo odlišnostmi při tisku. Došlo k výraznému snížení množství protékaného materiálu tryskou. Pro zajištění spojení vrstev byl zvýšen koeficient extruze a teplota hot endu. Navýšení bylo naddimenzováno, což vedlo při tisku výplně k vytváření převisů, které následně po kolizi s tryskou, způsobily posun vrstev. Při tisku opravného tělesa již k tomuto efektu nedocházelo.

Výška tělesa byla u prvního tisku 40,4 mm. U opravného tisku bylo naměřeno 40,2 mm. To může stále svědčit o zvýšené extruzi materiálu.

Měřený rozměr se zpravidla neshoduje s grafickým modelem součásti. Prvním důvodem je výška vrstev. Jak je ukázáno na výpočtu kalibrační kostky v rovnici (4-56), kde není výška vrstvy násobkem potřebného rozměru. Druhý vliv na skutečnou výšku součásti je vlastní hmotnost tisknutého modelu, která způsobí kríkové chování (viz Obr. 1-11).

Dáno:

$$h = 40 \text{ mm}$$

$$l_{h1} = 0,39 \text{ mm}$$

$$l_h = 0,3 \text{ mm}$$

$$n_l = \frac{h - l_{h1}}{l_h} + 1 = \frac{40 \text{ mm} - 0,39 \text{ mm}}{0,3 \text{ mm}} + 1 \doteq 133 \quad (4-55)$$

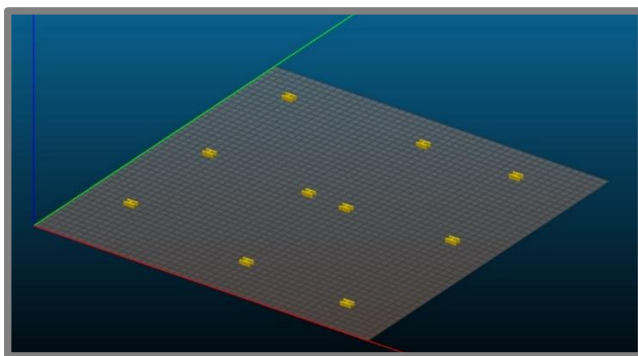
$$h_s = l_{h1} + (n_l - 1) \cdot l_h = 39,99 \text{ mm} \quad (4-56)$$

kde:

h	mm	je výška součásti
l_{h1}	mm	- výška první vrstvy
l_h	mm	- výška vrstvy
n_l		- počet vrstev
h_s	mm	- skutečná výška modelu

Třetím modelem bylo rozměrově malé těleso ve tvaru H. To bylo umístěno na různá místa tiskové podložky tak, aby byla provedena kontrola schopnosti stroje tisknout po celé tiskové ploše. Zde bylo nutné použít ABS džus, který pomohl přilnout modelu k použité maskovací pásce. Důvodem nepřilnutí těles byla pravděpodobně znečištěná podložka.

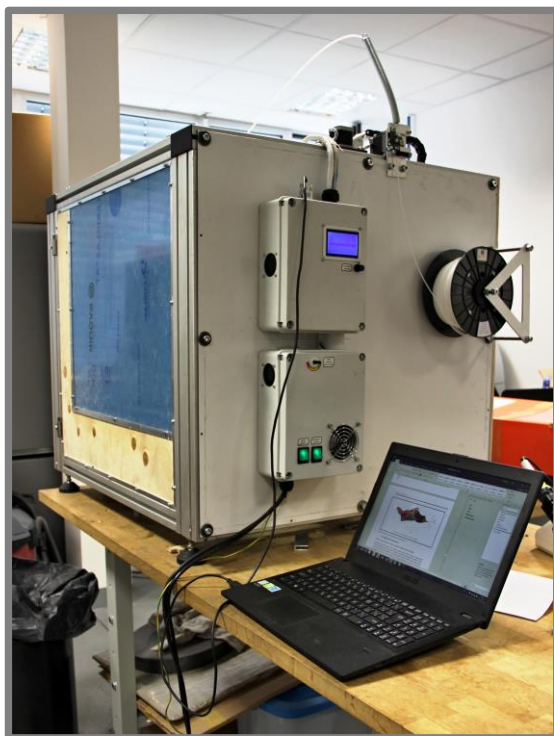
Modely byly tisknuty ve dvojicích. Tisk po ověření správné kalibrace tiskové plochy byl přerušen a byla změněna poloha dílů.



Obr. 4- 27 Rozmístění kalibračních těles po podložce



Obr. 4- 28 Vytisknuté testovací modely



Obr. 4- 29 Testovací provoz tiskárny

5 DISKUZE

5.1 Shrnutí práce

5.1

V rámci bakalářské práce byla navrhnutá a zkonstruována velkoformátová 3D tiskárna, která umožňuje tisk z běžně dostupných typů polymerů jako je ABS, PLA nebo PET-G. Hlavní předností je uzavřená konstrukce, kde je možné v tiskové komoře dosáhnout konstantní teploty až 80 °C. To umožňuje tisk rozměrných dílů, aniž by docházelo k nadměrným deformacím výsledného produktu. Proti selhání tisku při stavbě první vrstvy slouží kalibrační cyklus, který je kombinován se softwarovým rovnáním tiskové plochy.

Při návrhu bylo dbáno na zajištění funkčnosti takto rozměrného stroje. Z tohoto důvodu bylo vybíráno mezi kovovými, avšak cenově dostupnými materiály. Konstrukce tiskárny umožňuje tisk součástí o rozměrech (520 x 520 x 480) mm, čímž bylo splněno zadání práce. Byla provedena optimalizace tiskových parametrů pro materiál ABS, který je u rozměrných dílů problematické aplikovat vzhledem k velkému koeficientu teplotní roztažnosti (smrštivosti).

Pro zjednodušení přípravy tisku byl připraven profil tiskárny s používaným materiálem ABS v programu Slic3r, který umožňuje rozsáhlé nastavení tiskových parametrů, a tím dosažení požadované kvality.

5.2 Ekonomické a časové hledisko práce

5.2

Na tiskárně je použito více než 700 součástí, z toho bylo v rámci práce ohráběno více než 50 komponentů. Vývoj v grafickém prostředí představoval více než 100 hodin práce, kde byl brán ohled především na snadnou vyrobiteľnosť, dostupnosť a v neposlední řadě i cenové hledisko při maximalizaci využití dostupných součástek. Výsledná cena za zakoupené komponenty činí 13 800 Kč. Nejvýznamnější samostatnou položkou je topná slídová deska v hodnotě 2 500 Kč. Následné výroby součástí, montáži a zprovoznění tiskárny bylo věnováno 600 hodin.

5.3 Vývoj tiskárny

5.3

Další vývoj tiskárny by měl směřovat ke zvyšování tiskových rychlostí, protože u velmi rozměrných dílů je doba tisku velmi limitujícím faktorem. Zjednodušení ovládání by snížilo riziko chyb a následných finančních ztrát z důvodu nepovedených tisků. Zkrácení doby výhřevu tiskové plochy by bylo možné dosáhnout pomocí izolace spodní strany topné desky. Elektronicky řízená regulace skupiny ventilátorů by usnadnila udržení přednastavené teploty v celém prostoru tiskárny.

6 ZÁVĚR

Všechny cíle práce byly splněny. Úkolem této práce bylo navrhnout, vyrobit a na zkušebním tisku ověřit funkčnost tiskárny velkorozměrných dílů. V první kapitole jsou popsány parametry ovlivňující kvalitu tisku, běžně používané komponenty a konstrukční řešení 3D tiskáren založených na technologii FDM. Dále byla provedena analýza problému a zhodnocení cíle práce, ze kterých vyplynuly požadavky na zhotovení 3D tiskárny. Ve třetí kapitole této práce jsou vyhodnocena možná konstrukční uspořádání a vybrána nejvhodnější řešení. Konstrukční řešení práce je popsáno v kapitole čtvrté.

Výstupem této práce je funkční velkoformátová tiskárna testovaná pro materiál ABS. Rozměr tiskového prostoru je (520 x 520 x 480) mm. Tiskárna je v jednotryskovém provedení pro filament o průměru 1,75 mm. Tisková hlava je osazena celokovovým hot endem s tryskou o vnitřním průměru 0,6 mm.

Ověření tiskárny bylo provedeno na testovacích vzorcích. Zde byla pozorována především možnost tisku po celé stavební ploše tiskárny a rozměrová přesnost. Realizovaná tiskárna najde uplatnění při výrobě nestandardních dílů laboratoře StrojLab, kde bude dále vyvíjena.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- (1) CHUA, Chee Kai. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Fifth edition of Rapid prototyping. World Scientific: , 2017. ISBN 978-9813146761.
- (2) Direct Digital Manufacturing – What it is and how it works - White Paper. In: *Engineering.com* [online]. Edin Prairie (Minnesota): Stratasys [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.engineering.com/ResourceMain.aspx?resid=235>
- (3) About Stratasys. *Stratasys* [online]. Edin Prairie (Minnesota): Levin, 2015 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/corporate/about-us>
- (4) Fused Deposition Modelling. In: *Additive3d.com* [online]. Berlin: Markelapellaniz, 2016 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.additive3d.com/extrusion-deposition-fused-deposition-modeling-fdm/>
- (5) MatWeb - Thermoplastic. *MatWeb: Material Property Data* [online]. Blacksburg (Virginia): MatWeb, 2017 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/Search/MaterialGroupSearch.aspx?GroupID=12>
- (6) BENIAK, Juraj. *Systémy Rapid Prototyping*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-4287-0.
- (7) Selective Laser Sintering. In: *3D Systems* [online]. Rock Hill (South Carolina): 3D Systems, 2015 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/on-demand-manufacturing/selective-laser-sintering>
- (8) Section view of the printing process. In: *I.materialise* [online]. Antwerpen: 3D Printing Blog, 2014 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://i.materialise.com/blog/wp-content/uploads/2014/12/stereolithography-section-view.jpg>
- (9) SLS. In: *Virginia Tech: Department of Mechanical Engineering* [online]. Blacksburg (Virginia): Virginia Tech, 2014 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://seb199.me.vt.edu/dreams/wp-content/uploads/sites/18/2014/03/SLS-picture-1.png>
- (10) *RepRap* [online]. Bath: RepRap.org, 2017 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://reprap.org/>
- (11) The Difference Between ABS and PLA for 3D Printing. *ProtoParadigm* [online]. Milton Freewater (Oregon): Chilson, 2013 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: <http://www.protoparadigm.com/news-updates/the-difference-between-abs-and-pla-for-3d-printing/>
- (12) ABS-plus-P430. *Stratasys* [online]. Edin Prairie (Minnesota): Levin, 2016 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_FDM_ABSplusP430.pdf
- (13) HARPER, Charles A. *Modern Plastics Handbook*. New York: McGraw-Hill, c2000. ISBN 00-702-6714-6.
- (14) PET vs. PETG: What is the difference? *WHEATON* [online]. Millville (New Jersey): Petrosh, 2016 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://blog.wheaton.com/pet-vs-petg-what-is-the-difference/>

- (15) Print Quality Troubleshooting Guide. *Simplify3D* [online]. Blue Ash (Ohio): Simplify 3D, 2017 [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/#not-extruding-at-start-of-print>
- (16) PILCH, Zbigniew, Jaroslaw DOMIN a Andrzej SZLAPA. The impact of vibration of the 3D printer table on the quality of print. *2015 Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics (WZEE)*. IEEE, 2015, , 1-6. DOI: 10.1109/WZEE.2015.7394045. ISBN 978-1-4673-9452-9. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7394045/>
- (17) ANITHA, R., S. ARUNACHALAM a P. RADHAKRISHNAN. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001, 118(1-3), 385-388. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00980-3. ISSN 09240136. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013601009803>
- (18) PRSA, Jelena, Julian MULLER, Franz IRLINGER a Tim C. LUETH. Evaluation of the infill algorithm for trajectory planning of pointed ends for droplet-generating 3D printers. *2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014)*. IEEE, 2014, , 1560-1565. DOI: 10.1109/ROBIO.2014.7090556. ISBN 978-1-4799-7397-2. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7090556/>
- (19) LI, L., Q. SUN, C. BELLEHUMEUR a P. GU. Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 2002, 4(2), 129-141. DOI: 10.1016/S1526-6125(02)70139-4. ISSN 15266125. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612502701394>
- (20) Bellehumeur, C., Li, L., Sun, Q., & Gu, P. (2004). Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process. *Journal of Manufacturing Processes*, 6(2), 170-178. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/195248994?accountid=17115>
- (21) LI, L., Q. SUN, C. BELLEHUMEUR a P. GU. Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 2002, 4(2), 129-141. DOI: 10.1016/S1526-6125(02)70139-4. ISSN 15266125. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612502701394>
- (22) SUN, Q., G.M. RIZVI, C.T. BELLEHUMEUR a P. GU. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*. 2008, 14(2), 72-80. DOI: 10.1108/13552540810862028. ISSN 1355-2546. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/13552540810862028>
- (23) Soustava souřadnic v prostoru. *Analytická geometrie: Souřadnice - Soustava souřadnic v prostoru* [online]. Praha: Univerzita Karlova, 2009 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://kdm.karlin.mff.cuni.cz/diplomky/jan_koncel/souradnice.php?kapitola=soustavaSouradnicP
- (24) Soustavy souřadnic. *Matematika.cuni.cz: Portál pro vysokoškolskou matematiku* [online]. Praha: Univerzita Karlova, 2014 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://matematika.cuni.cz/dl/analyza/animace/k0033/souradnice/home.htm>
- (25) Kartézský souřadný systém. In: *SCIA Engineer* [online]. Herk-de-Stad: SCIA, 2015 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://help.scia.net/16.0/cs/rb/basics/images/cart.gif>

- (26) Válcový souřadnicový systém. In: *Solid Works* [online]. Vélizy-Villacoublay: Solid Works, 2016 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://help.solidworks.com/2016/czech/SolidWorks/cworks/xkt1450460269342.image>
- (27) *Automatizační a robotická technika: Příručka*. Košice, 2011. Dostupné také z: http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/files/vystupy/prirucka_sk_final.pdf
- (28) Rostock Mini. In: *RepRap* [online]. Bend (Oregon): Rostock, 2014 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/File:Rostock_mini.png
- (29) Scalar Family - 3D Printer. In: *Thingiverse.com* [online]. Cergy: 3D Modular systems, 2015 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: http://thingiverse-production-new.s3.amazonaws.com/renders/bd/51/7c/a8/19/Scalar_M_preview_featured.jpg
- (30) Stratasys FDM. In: *AIP Works* [online]. Helsinki: SolidWorks, 2015 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: http://aipworks.fi/wp-content/themes/LevelupHtml5bootstrapV5/includes/Stratasys_fdm_bom.svg
- (31) Ultimaker 2- Drive Belts. In: *Digital Trends* [online]. Portland (Oregon): Digital Trends, 2016 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://icdn8.digitaltrends.com/image/ultimaker-2-drive-belts-640x640.jpg>
- (32) Drawbacks of the H-Bot. In: *DoubleJumpElectric* [online]. Claremont (California): Joshua Vasquez, 2014 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: http://www.doublejumpelectric.com/projects/core_xy/pics/hbot.svg
- (33) The CoreXY. In: *DoubleJumpElectric* [online]. Claremont (California): Joshua Vasquez, 2014 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: http://www.doublejumpelectric.com/projects/core_xy/pics/coreXY.svg
- (34) Polar 3D. In: *Pinterest* [online]. Cincinnati (Ohio): Polar 3D, 2014 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/329325791477634381/>
- (35) Ozubené řemeny. In: *Pikron* [online]. Ústí nad Labem: Pikron, 2016 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: <https://www.pikron.cz/admin/images/1004.pdf>
- (36) Lines Of The Side Of Print. In: *Simplify 3D* [online]. Blue Ash (Ohio): Simplify 3D, 2017 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/wp-content/uploads/2015/09/Lines-On-Side-Of-Print.jpg>
- (37) Layer Shifting. In: *Simplify 3D* [online]. Blue Ash (Ohio): Simplify3D, 2017 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/wp-content/uploads/2015/09/Layer-Shifting.jpg>
- (38) Hot End V6 - 1,75. In: *E3D online* [online]. Chalgrove: E3D, 2014 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://e3d-online.com/image/data/v6/V6-175.png>
- (39) Explained Warping. In: *Rigid.ink* [online]. Wetherby: Rigid, 2016 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0714/6487/files/warping_explained.jpg?v=1478857124
- (40) Warping. In: *Capolight Electronics Projects*. [online]. Melbourne: CEP., 2010 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <https://capolight.files.wordpress.com/2010/07/hotbed-warping-copy.jpg>
- (41) RepRap Heated Bed. In: *Rep Rap* [online]. Bath: RepRap, 2012 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/File:Reprap_heated_bed.jpg

- (42) Topné silikonové těleso. In: *IWO group* [online]. Praha: IWO group, 2017 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: http://eshop.iwogroup.eu/data/shop_iwo/produkty/all_55_67_b.jpg
- (43) Deska. In: *Jakub Šerých* [online]. Praha: Šerých, 2011 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://jakub.serych.cz/sites/all/files/images/deska2.jpg>
- (44) Topná slidová deska. In: *Acid Jouanin: Průmyslová topná tělesa* [online]. Olomouc: Acid Jouanin, 2014 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.acim-jouanin.cz/images/topne-desky-slidove-bez-plaste.2.jpg>
- (45) Katalog ALutec KK. *Alutek KK* [online]. Alutec, 2017 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://katalogaluteckk.aspone.cz/>
- (46) Product Information. In: *THK* [online]. Šinagawa: THK, 2017 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: <https://tech.thk.com/en/products/thkdlinks.php?id=406>
- (47) Lineární vedení. In: *Hiwin* [online]. Brno: Hiwin, 2017 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: www.hiwin.cz/media/files/01_Linearni_vedeni.pdf
- (48) Odhad třecího momentu. In: *SKF* [online]. Göteborg: SKF, 2017 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/principles/friction/estimating-frictional-moment/index.html>
- (49) Převody ozubenými řemeny. In: *Walther Flender* [online]. Kolín: Flender, 2015 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: <http://www.walther-flender.cz/catalogs/Prevody-ozubenymi-remeny.pdf>
- (50) Nespojené ozubené řemeny. *Technika a trh*. 2006, **2006**(9), 2-4.
- (51) Základní technické informace. In: *Ehlinik.cz* [online]. Pardubice: ehlinik.cz, 2015 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.ehlinik.cz/prilohy/zakladni-technicke-informace.pdf>
- (52) Kontaktní napětí. SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIMUM, 2010, s. 175-180. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- (53) Lanové převody. SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIMUM, 2010, s. 1029-1036. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- (54) STN EN 1993-1-11: 2011. Navrhovanie oceľových konštrukcií. Časť 1-11: Navrhovanie konštrukcií s ťahanými prvkami. 11. Bratislava: STN, 1993.
- (55) Závislost procentuálního snížení jmenovité únosnosti lana v důsledku ohybu lana kolem kladky či bubnu na poměru D/d. SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIMUM, 2010, s. 1029-1036. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- (56) Pohybové šrouby. SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIMUM, 2010, s. 423-431. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- (57) Lichoběžníkový rovnoramenný jednoduchý závit. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008, s. 383. ISBN 978-80-7361-051-7.

- (58) Valivá ložiska. SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUT IUM, 2010, s. 609-660. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- (59) F8-16M Ball Thrust Bearings. AST [online]. Montville (New Jersey): AST, 2016 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.astbearings.com/catalog.html?page=product&id=F8-16M>
- (60) Pohybové šrouby. SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUT IUM, 2010, s. 423-431. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- (61) Lichoběžníkový rovnoramenný jednoduchý závit. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008, s. 383. ISBN 978-80-7361-051-7.
- (62) Trapézové šrouby. In: *Conti* [online]. Barzago: Conti, 2015 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.contigroup.it/Catalogo/Catalogo-CZ.pdf>
- (63) Teplotní součinitel délkové roztažnosti tuhých látek. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008, s. 58. ISBN 978-80-7361-051-7.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka	Význam
3D	Třídimenzionální
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
CNC	Computer numerical control
FDM	Fused deposition modeling
LCD	Liquid crystal display
PCB	Printed circuit board
PEEK	Polyéteréterketón
PET-G	Polyethylentereftalát glykol
PLA	Polylactid acid
PTFE	Polytetrafluorethylen
RAMPS	RepRap Arduino Mega Pololu shield
RepRap	Self replicating rapid prototyping
RP	Rapid prototyping
SD	Secure digital
SLA	Stereolitografie
SLM	Selective lase melting
STL	Stereolitography
UV	Ultraviolet
VUT	Vysoké učení technické v Brně
AM	Additional manufacturing
HIPS	High Impact Polystyrene
PVA	Polyvinylalkohol
DDM	Direct digital manufacturing

Veličina	Jednotka	Popis
$a_{x,y}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	- zrychlení os x a y
a		- exponent lineární regrese zatížení
b	mm	- poloměr kontaktní oblasti
b_b	mm	- šířka použitého řemenu
b_{bn}	mm	- šířka katalogového řemenu
C_{dyn}	N	- základní dynamická únosnost ložiska
D	mm	- průměr kladky
d_2	mm	- střední průměr závitu matice
d_3	mm	- malý průměr závitu matice
d_{b1}	mm	- vnitřní průměr ložiska
d_{b2}	mm	- vnější průměr ložiska
d_k	mm	- malý průměr podávacího kola
d_p	mm	- průměr otvoru kladky
d_r	mm	- průměr lana
d_s	mm	- průměr dřívku válcovaného šroubu
d_w	mm	- průměr drátu lana
d_p	mm	- roztečný průměr řemenice
E_{11}	MPa	- modul pružnosti v tahu vzorku s podélnými vlákny
E_{22}	MPa	- modul pružnosti v tahu vzorku s příčnými vlákny
E_b	GPa	- modul pružnosti řemenu
E_l	MPa	- modul pružnosti lana v tahu
E_r	GPa	- redukovaný modul pružnosti v tahu
$E_{s,i}$	kr./mm	- počet kroků motoru extrudéru na mm
E_{xx}^{45}	MPa	- modul pružnosti v tahu vzorku s vlákny pod úhlem 45°
f		- koeficient tření ocel – bronz
F	N	- síla potřebná pro pohyb tiskové hlavy
F_a	N	- axiální síla na ložisko
F_{Al}	N	- síla působící na hliníkový profil
F_b	N	- zatěžující síla použitého řemenu
F_G	N	- tíhová síla
F_l	N	- tažná síla lana
f_m		- koeficient tření matice
F_{min}	N	- minimální síla lana do přetržení
F_N	N	- zatížení katalogového řemenu
F_{pt}	N	- síla potřebná pro předpětí řemenů
F_r	N	- radiální síla na ložisko
F_t	N	- síla působící na matici
F_{TF}	N	- třecí síla ložiska F695ZZ
F_{TL}	N	- třecí síla lineárního vedení
F_{TMF}	N	- třecí moment ložiska MF84ZZ

F_v	N	-	tíhová síla vozíku
$F_{x,y}$	N	-	využitelná síla od motorů
g	$m \cdot s^{-2}$	-	gravitační zrychlení
G_{12}	MPa	-	modul pružnosti v ohybu
h	mm	-	výška součásti
h_s	mm	-	skutečná výška modelu
k_d		-	bezpečnost vůči otlačení
k_k		-	koeficient bezpečnosti vůči meznímu stavu pružnosti
k_l		-	bezpečnost lana vůči přetržení
k_m		-	koeficient bezpečnosti pro pohyb vozíku
k_p		-	koeficient bezpečnosti vůči otlačení
$k_{X,Y}$		-	bezpečnost návrhu motorů X a Y
l	%	-	procentuální snížení únosnosti lana
L_{10}		-	základní výpočtová trvanlivost
l_b	mm	-	délka použitého řemenu
L_D	hod	-	základní trvanlivost ložiska
l_h	mm	-	výška vrstvy
l_{h1}	mm	-	výška první vrstvy
l_n	mm	-	původní délka katalogového řemenu
L_n	mm	-	délka matice
l_p	mm	-	požadovaná vzdálenost
l_s	mm	-	skutečná vzdálenost
l_t	mm	-	styčná délka desek
m	kg	-	hmotnost pohyblivých částí
M	$N \cdot m$	-	třecí moment ložiska
M_F	$N \cdot m$	-	třecí moment ložiska F695ZZ
m_i	MPa^{-1}	-	materiálová konstanta
M_m	$N \cdot mm$	-	točivý moment motorů
M_{MF}	$N \cdot m$	-	třecí moment ložiska MF84ZZ
$M_{X,Y}$	$N \cdot m$	-	točivý moment motoru X a Y
M_{zv}	$N \cdot mm$	-	moment potřebný pro pohyb vozíku
M_{zv0}	$N \cdot mm$	-	moment potřebný pro pohyb vozíku bez závaží
n	min^{-1}	-	otáčky motoru
n_D	min^{-1}	-	maximální otáčky šroubu
n_l		-	počet vrstev
n_w		-	počet drátů lana
p	mm	-	rozteč zubů řemene
P	N	-	ekvivalentní zatížení ložiska
p_d	MPa	-	dovolený tlak v matici
P_h	mm	-	stoupání závitu

p_{\max}	MPa	-	maximální tlak
p_n	MPa	-	působící tlak v matici
r_e	mm	-	redukovaný poloměr křivosti
$R_{p0,2}$	MPa	-	mez kluzu trapézového šroubu
$R_{p0,2_{Al}}$	MPa	-	mez kluzu slitiny AlMgSi _{0,5}
s_d		-	mikrokrokování řadiče motoru
s_m	kr.	-	počet základních kroků motoru na otáčku
t	mm	-	tloušťka profilu
t_b	mm	-	tloušťka nosného profilu použitého řemenu
t_n	mm	-	tloušťka nosného profilu katalogového řemenu
v	mm/s	-	tisková rychlost
$v_{z \max}$	mm · s ⁻¹	-	maximální rychlost v ose z
x	mm	-	vzdálenost rámu od kladky v ose x
X_s	kr./mm	-	počet kroků motoru X na mm
y	mm	-	výška pojezdu
Y_s	kr./mm	-	počet kroků motoru Y na mm
z		-	počet zubů řemenice
Z_s	kr./mm	-	počet kroků motorů Z na mm
α	°	-	vrcholový úhel závitu
α_{Al}	K ⁻¹	-	teplotní součinitel délkové roztažnosti hliníku
α_{Fe}	K ⁻¹	-	teplotní součinitel délkové roztažnosti oceli
δ	mm	-	prodloužení katalogového řemenu
Δ	mm	-	rozměr mezery
δ_b	mm	-	prodloužení použitého řemenu
Δl	mm	-	délkový rozdíl
ΔT	K	-	teplotní rozdíl
ε		-	poměrné prodloužení katalogového řemenu
η		-	účinnost ozubeného řemenu
μ		-	koeficient tření maziva
μ_{12}		-	Poissonova konstanta
σ	MPa	-	normálové napětí katalogového řemenu
σ_1	MPa	-	normálové napětí
σ_{red}	MPa	-	redukované napětí
τ_1	MPa	-	smykové napětí
φ	rad	-	úhel lana

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Schéma metody FDM (4)	16
Obr. 1-2 Princip metody SLA (8).....	17
Obr. 1-3 Schéma SLS tiskárny (9)	17
Obr. 1-4 Druhy extruze metodou FDM (1)	19
Obr. 1-5 Součást s ostrým úhlem 5° (18).....	20
Obr. 1-6 Opakovaný způsob výplně (18)	20
Obr. 1-7 Algoritmus s vkládáním přídavných a odstranění nadbytečných kapek (18).....	20
Obr. 1-8 Kladná mezera vláken (19)	21
Obr. 1-9 Záporná mezera vláken (19)	21
Obr. 1-10 Geometrie zkušebního tělesa pro zkoušku tahem (19)	21
Obr. 1-11 Řez tisknutou součástí (22).....	23
Obr. 1-12 Kartézský souřadný systém (25).....	24
Obr. 1-13 Cylindrický souřadný systém (26).....	24
Obr. 1-14 Rám delta tiskárny Rostock Mini (28).....	24
Obr. 1-15 Portálová tiskárna Scalar (29).....	24
Obr. 1-16 Provedení mostové konstrukce firmy Stratasys (30)	25
Obr. 1-17 Detail pohonu tiskárny Ultimaker (31).....	25
Obr. 1-18 Kinematika H-Bot (32)	26
Obr. 1-19 Kinematika Core-XY (33)	26
Obr. 1-20 Tiskárna Polar 3D využívající polárních souřadnic (34)	26
Obr. 1-21 Wobbling (36).....	28
Obr. 1-22 Layer shifting (37)	28
Obr. 1-23 Řez hot endem (38).....	29
Obr. 1-24 Znázornění tepelného smrštění výtisku (39).....	30
Obr. 1-25 Znázornění vnitřního pnutí výtisků (40).....	31
Obr. 3-1 Rám z ocelových plechů	34
Obr. 3-2 Ocelový rám.....	34
Obr. 3-3 Rám z hliníkových profilů	34
Obr. 3-4 PCB topná deska pro RepRap (41)	35
Obr. 3-5 Silikonová topná deska (42)	35
Obr. 3-6 Deska s topnými odpory (43)	35
Obr. 3-7 Topná slídová deska (44).....	35
Obr. 3- 8 Slepované hliníkové lamely.....	37
Obr. 3- 9 Skládané papírové měchy	37
Obr. 4-1 Model 3D tiskárny	39
Obr. 4-2 Tisková hlava při montáži měchového systému	40
Obr. 4-3 Most osazený koncovým spínačem	40
Obr. 4-4 Uspořádání roviny x, y	40
Obr. 4-5 Řez modelem pro odlitek nosiče extrudéru	41
Obr. 4-6 Formování modelů odlévaných součástí	41
Obr. 4-7 Vedení osy z	45
Obr. 4-8 Výroba nosných částí osy z	45
Obr. 4-9 Schéma uložení pohybového šroubu.	46
Obr. 4-10 Schéma silového a momentového působení pro osu z	46
Obr. 4-11 Silový rozbor závaží	47

Obr. 4-12 Silový rozbor kladky.....	48
Obr. 4-13 Schéma silového působení na tiskovou podložku	51
Obr. 4-14 Sestava stiskového stolu	56
Obr. 4-15 Schéma zapojení elektroniky tiskárny	57
Obr. 4-16 Krycí měchy.....	58
Obr. 4-17 Uchycení měchů osy x	58
Obr. 4-18 Uchycení měchů na tiskové hlavě	58
Obr. 4-19 Modifikovaný extrudér	59
Obr. 4-20 Instalace hot endu	59
Obr. 4-21 Vedení kabelů v profilové drážce	59
Obr. 4-22 Energetický kabel	59
Obr. 4-23 Hotový tisk s nedostatečnou extruzí materiálu	64
Obr. 4-24 Zkalibrovaná extruze materiálu	64
Obr. 4-25 Průběh tisku kalibrační kostky.....	64
Obr. 4-26 Tisk bez krycích měchů	64
Obr. 4- 27 Rozmístění kalibračních těles po podložce.....	65
Obr. 4- 28 Vytisknuté testovací modely.....	65
Obr. 4- 29 Testovací provoz tiskárny.....	66
Graf 1-1 Závislost tiskové rychlosti na rozkmitu tiskové podložky (16).....	19
Graf 1-2 Rozložení teploty tištěného vlákna (20)	23
Graf 4-1 Závislost procentuálního snížení jmenovité únosnosti lana (55).....	50
Graf 4-2 Znázornění povrchu tiskové plochy před kalibrací	63
Graf 4-3 Znázornění povrchu tiskové podložky po mechanické kalibraci	63

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1-1 Základní úkony při post-processing (1)	17
Tab. 1-2 Vlastnosti vybraných materiálů pro tisk technologií FDM (5).....	18
Tab. 1-3 Použité parametry tisku (17).....	19
Tab. 1-4 Srovnání teoreticky zjištěných hodnot s experimentálně zjištěnými vzorky (19)	22
Tab. 3-1 Charakteristiky lineárních vedení pro osu x (45)(46)	36
Tab. 4-1 Iterační přiblížení skutečné hodnoty počtu kroků na otáčku	61
Tab. 4-2 Kalibrační G-kód	61

11 SEZNAM PŘÍLOH

11

Příloha 1 Fotodokumentace

Příloha 2 Cenová kalkulace tiskárny

Externí přílohy:

Příloha 3 Výkresová dokumentace

Příloha 4 DVD

- 3D model tiskárny
- výkresová dokumentace
- seznam dílů
- firmware tiskárny
- slicer

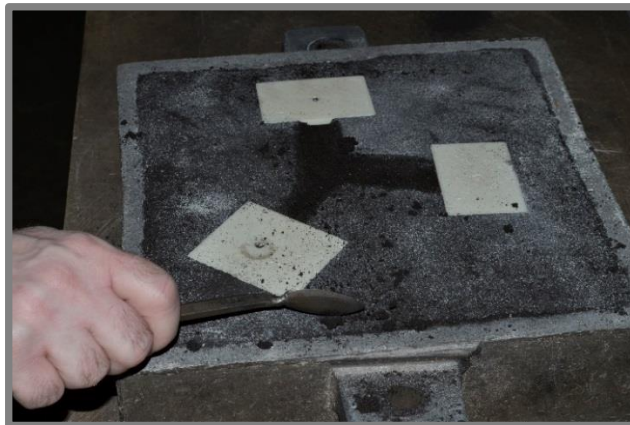
12 PŘÍLOHY

12

Příloha 1 Fotodokumentace



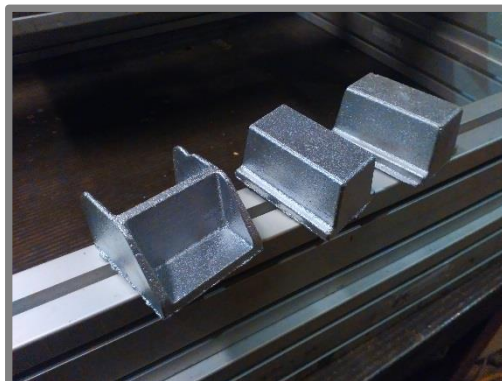
Lineární vedení THK



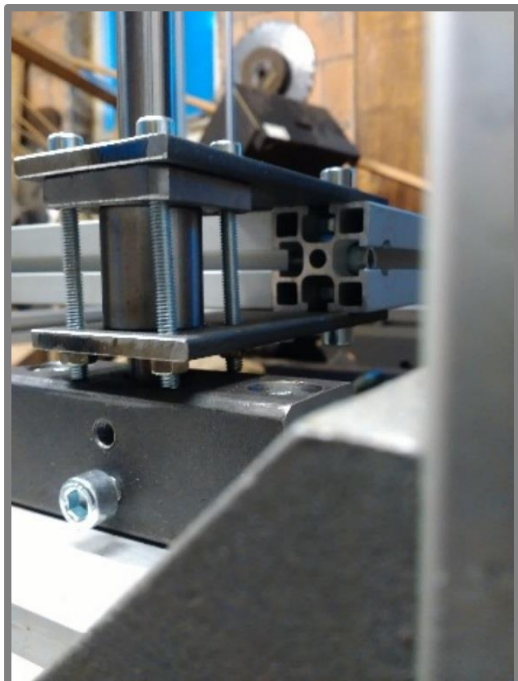
Zaformované modely



Chlazení odlitků



Odlitky s odstraněnou vtokovou soustavou



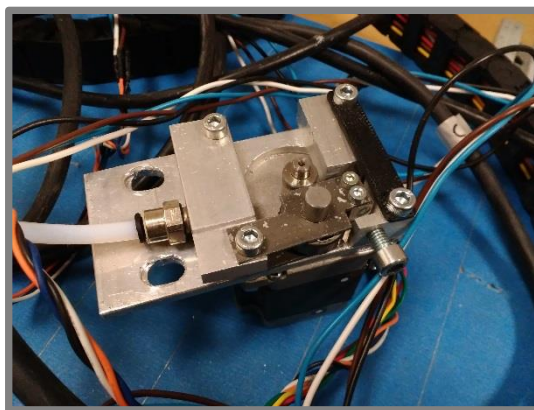
Vedení osy z



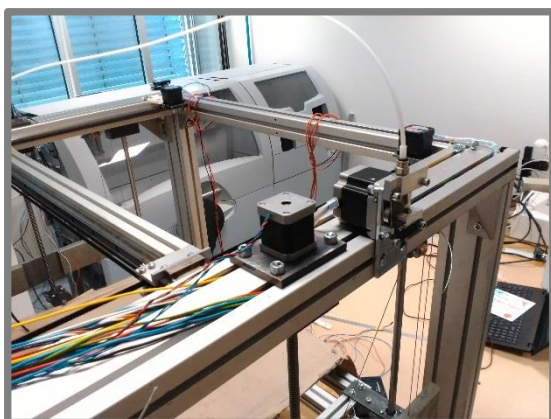
Obrábění odlitků



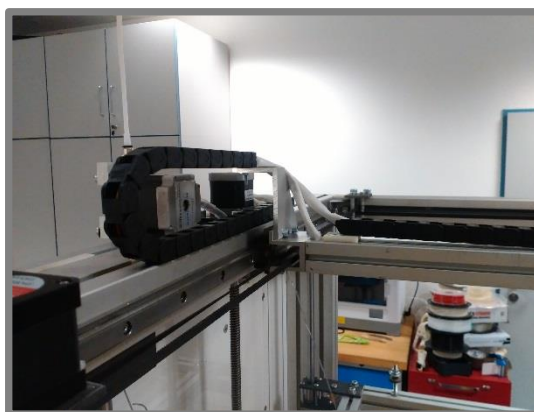
Uložení vodících tyčí



Extrudér



Kabeláž



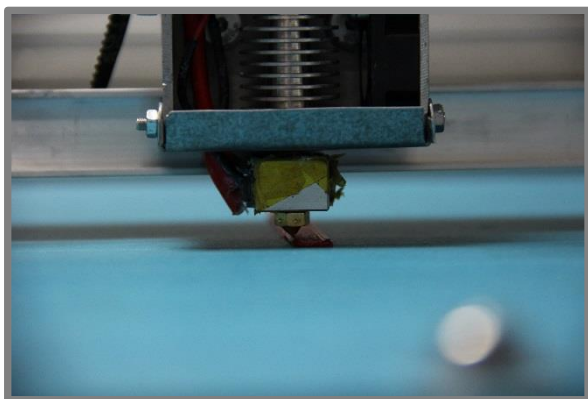
Kabeláž energetickými kabely



Zakrytování tiskárny



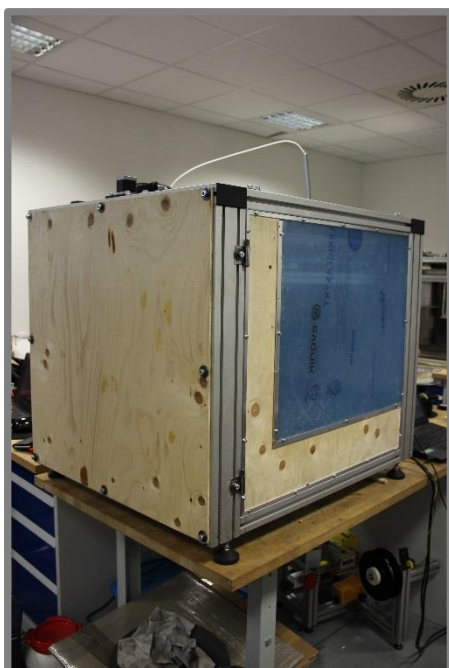
Elektronika



První tisk



Snímač koncové polohy osy z



Sestavená 3D tiskárna



Tisková hlava

Příloha 2 Cenová kalkulace tiskárny

Položky*	Cena (Kč)
Trapézové závity s maticemi	1200
Ocelové polotovary	300
Hliníkové polotovary	1400
Lineární vedení	2100
Vodící tyče s kuličkovými pouzdry	700
Hliníkové stavební profily	4700
Dřevotřísková deska	500
Spojovací materiál	900
Krokové motory	1500
Plexisklo	300
Řídící elektronika s řadiči motorů a displejem	1400
Zdroj	900
Spínací prvky a jistící prvky	300
Krabice na elektroniku	400
Pružné spojky	250
Kabely	400
Energetické kabely	300
Ložiska	200
Hot end	1800
Topná slídová deska	2500
Celkem	22 030

*Pozn. ceny jsou uvedeny pro komponenty použité na tiskárně,
neshoduje se s nakupovanými díly